



ITS

Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

**SIMULASI DAN PEMODELAN PENGARUH *HYBRID
DISTRIBUTED GENERATION* TERHADAP
STABILITAS TRANSIEN DAN TEGANGAN**

Pinanggih Rahayu
NRP 07111440000007

Dosen Pembimbing
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D
Dr. Ir. Soedibyo, M.MT

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



ITS

Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

**SIMULASI DAN PEMODELAN PENGARUH *HYBRID
DISTRIBUTED GENERATION* TERHADAP
STABILITAS TRANSIEN DAN TEGANGAN**

Pinanggih Rahayu
NRP 0711144000007

Dosen Pembimbing
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D
Dr. Ir. Soedibyo, M.MT

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



FINAL PROJECT - TE 141599

SIMULATION AND MODELLING OF HYBRID DISTRIBUTED GENERATION'S IMPACT ON TRANSIENT AND VOLTAGE STABILITY

Pinanggih Rahayu
NRP 0711144000007

Supervisors
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D
Dr. Ir. Soedibyo, M.MT

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tugas akhir saya dengan judul **“SIMULASI DAN PEMODELAN PENGARUH HYBRID DISTRIBUTED GENERATION TERHADAP STABILITAS TRANSIEN DAN TEGANGAN”** adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 16 Juli 2018



Pinanggih Rahayu
07111440000007

**SIMULASI DAN PEMODELAN PENGARUH *HYBRID*
DISTRIBUTED GENERATION TERHADAP STABILITAS
TRANSIEN DAN TEGANGAN**

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada

Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I



Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D
NIP. 194907151974121001

Dosen Pembimbing II



Dr. Ir. Soedibyo, M.MT
NIP. 195512071980031004



Halaman ini sengaja dikosongkan

SIMULASI DAN PEMODELAN PENGARUH *HYBRID DISTRIBUTED GENERATION* TERHADAP STABILITAS TRANSIEN DAN TEGANGAN

Nama mahasiswa : Pinanggih Rahayu

Dosen Pembimbing I : Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D

Dosen Pembimbing II : Dr. Ir. Soedibyo, M.MT

Abstrak:

Stabilitas tenaga listrik merupakan kemampuan sistem tenaga listrik dalam mempertahankan suatu kondisi tertentu terhadap berbagai gangguan yang terjadi. Ketidakmampuan dalam mempertahankan kondisi stabilitasnya akan berakibat buruk pada sistem tersebut. Di era modern ini sistem kelistrikan banyak terkoneksi dengan *distributed generation* (DG). Selain mampu mengurangi rugi daya sistem dan memperbaiki profil tegangan, DG juga memberikan pengaruh terhadap stabilitas tenaga listrik.

Pada tugas akhir ini, pengaruh dari kombinasi DG terhadap stabilitas dan kualitas daya akan disimulasikan menggunakan *software* Matlab R2015a. Penentuan lokasi pemasangan DG akan menjadi pertimbangan dalam tugas akhir ini. Kemudian, stabilitas yang menjadi fokus penelitian ini adalah stabilitas transien dan tegangan, sedangkan pada sisi kualitas daya yang diamati adalah profil tegangan, indek tegangan, dan rugi daya sistem. Pada penelitian ini metode yang digunakan dalam penentuan lokasi DG adalah metode analitik dengan mempertimbangkan sensitivitas bus, untuk stabilitas transien menggunakan *numerical simulation method based on critical trajectory* untuk mendapatkan waktu pemutus kritis, sedangkan pada stabilitas tegangan menggunakan metode *continuation power flow* yang dianalisis menggunakan kurva PV.

Dari simulasi tersebut didapatkan lokasi peletakan DG melalui optimasi dapat mengurangi rugi daya sistem yang signifikan, waktu pemutus kritis akibat instalasi *hybrid DG* lebih besar, profil tegangan dan indek tegangan semakin meningkat seiring meningkatnya pembangkitan daya aktif DG.

Kata kunci: *Distributed Generation, Numerical Simulation Method, Continuation Power Flow, Kurva PV*

Halaman ini sengaja dikosongkan

SIMULATION AND MODELLING OF HYBRID DISTRIBUTED GENERATION'S IMPACT ON TRANSIENT AND VOLTAGE STABILITY

Student Name : Pinanggih Rahayu
Supervisor I : Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D
Supervisor II : Dr. Ir. Soedibyo, M.MT

Abstract:

Power system stability is the ability of power system to maintain a certain condition against the various disturbances that occurs. The inability to maintain the stability conditions will have a negative impact on the system. In this modern era, many electrical systems are connected with distributed generation (DG). In addition to reducing power loss and improving the voltage profile, DG also gives effect to the power system stability.

In this final project, the effect of DG combination on stability and power quality will be simulated using Matlab R2015a. Determination of DG installation location will be considered in final project. Then, the stability that becomes the focus of this research is transient and voltage stability, while on the power quality side observed are voltage profile, voltage index, and power loss. In this research, the method used in determining the location of DG is the analytical method by considering the bus sensitivity, for transient stability using numerical simulation method based on critical trajectory to get critical clearing time, while on the voltage stability using continuation power flow method that analyzed using the PV.

Based on these simulations, location of DG placement through optimization can reduce significant power loss, critical clearing time due to larger hybrid DG installation, voltage profile and voltage index increases as increases of DG power generation.

Key Word: *Distributed Generation, Numerical Simulation Method, Continuation Power Flow, P-V Curve.*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji Syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala Rahmat, Karunia, dan Petunjuk yang telah dilimpahkan-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir dengan judul “**Simulasi dan Pemodelan Pengaruh Hybrid Distributed Generation terhadap Stabilitas Transien dan Tegangan**”.

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan jenjang pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Atas selesainya penyusunan tugas akhir ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT atas limpahan rahmat, karunia dan petunjuk-Nya.
2. Ibu penulis (Ibu Supiyani), tante (Ibu Sumutinah) dan om (Bapak Suprpto) serta keluarga besar penulis atas doa dan cinta yang tak henti pada penulis dalam keadaan apapun. Semoga Allah SWT senantiasa melindungi dan memberi mereka tempat terbaik kelak di surgaNya.
3. Bapak Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc, Ph.D selaku dosen pembimbing pertama yang telah memberikan arahan, bimbingan dan perhatiannya selama proses penyelesaian tugas akhir ini.
4. Bapak Dr. Ir. Soedibyo, M.MT selaku dosen pembimbing kedua yang telah memberikan arahan, bimbingan dan perhatiannya selama proses penyelesaian tugas akhir ini.
5. Bapak Dr. Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng yang telah membantu dan memberikan arahan dalam menyelesaikan algoritma *numerical simulation method based on critical trajectory*.
6. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Elektro ITS yang telah memberikan banyak ilmu dan menciptakan suasana belajar yang luar biasa.
7. Keluarga besar Fakultas Teknologi Elektro ITS angkatan 2014 (e54) yang telah bersama-sama menjalani proses perkuliahan selama kurang lebih 4 tahun.
8. Keluarga besar laboratorium PSSSL, Team S, GIS-GIS Club yang telah meramaikan grup Line dengan informasi-informasi yang tak terduga dan mengejutkan.
9. Keluarga besar laboratorium Tegangan Tinggi yang telah memberikan fasilitas dan menemani dalam mengerjakan laporan tugas akhir.

Dalam penulisan laporan tugas akhir ini, penulis telah berusaha maksimal demi terciptanya kualitas penelitian yang baik. Namun besar harapan penulis untuk menerima saran dan kritik guna perbaikan dan pengembangan tugas akhir ini. Semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat yang luas.

Surabaya, Juni 2018

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PERNYATAAN	
LEMBAR PENGESAHAN	

ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR TABEL	xi

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Metodologi.....	3
1.6 Sistematika.....	4
1.7 Relevansi	4

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Distributed Generation (DG).....	5
2.2 Sistem Distribusi Radial	7
2.3 Penempatan DG berdasarkan Metode Analitik	8
2.4 Analisis Aliran Daya.....	8
2.4.1 Analisis Aliran Daya Pasif	9
2.4.2 Analisis Aliran Daya Aktif.....	12
2.5 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik.....	13
2.5.1 Stabilitas Sudut Rotor	14
2.5.2 Stabilitas Frekuensi.....	15
2.5.3 Stabilitas Tegangan.....	15
2.6 Analisis Stabilitas Transien berdasarkan Pemodelan Sistem.....	15
2.7 Persamaan Ayunan (Swing Equation)	17
2.8 Metode Reduksi Kron.....	19
2.9 Metode Runge-Kutta Orde 4.....	20

2.10 Waktu Pemutus Kritis (CCT)	20
2.11 Analisis Stabilitas Tegangan berdasarkan Kurva P-V	21
2.12 Tegangan Jatuh	21
2.13 Continuation Power Flow Method	21
2.13.1 Predictor Step	22
2.13.2 Corector Step	23
2.13.3 Proses Solusi CPF	24

BAB III PERANCANGAN DAN PEMODELAN

3.1 Data Sistem Kelistrikan	25
3.1.1 Sistem Kelistrikan IEEE 13 Bus	25
3.1.2 Sistem Kelistrikan IEEE 28 Bus	26
3.1.3 Data Generator dan DG	27
3.2 Mekanisme Simulasi, Analisis dan Evaluasi Sistem	29
3.3 Simulasi, Analisis dan Evaluasi Stabilitas Tegangan	31
3.4 Simulasi, Analisis dan Evaluasi Stabilitas Transien	32

BAB IV HASIL SIMULASI DAN ANALISIS

4.1 Sistem Kelistrikan IEEE 13 Bus	35
4.1.1 Hasil Simulasi Stabilitas Tegangan	35
4.1.2 Hasil Simulasi Stabilitas Transien	44
4.2 Sistem Kelistrikan IEEE 28 Bus	54
4.2.1 Hasil Simulasi Stabilitas Tegangan	54
4.2.2 Hasil Simulasi Stabilitas Transien	65
4.3 Analisis Stabilitas Transien dan Tegangan	74

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan	75
5.2 Saran	75

DAFTAR PUSTAKA	77
-----------------------------	----

LAMPIRAN	79
-----------------------	----

RIWAYAT HIDUP	81
----------------------------	----

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Tipe DG berdasarkan kapasitas.....	6
Gambar 2.2	Sistem Distribusi Radial	7
Gambar 2.3	Contoh single line diagram sistem radial.....	9
Gambar 2.4	Ilustrasi pemodelan negatif PQ bus.....	13
Gambar 2.5	Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga Listrik	14
Gambar 2.6	Pemodelan generator	16
Gambar 2.7	Ilustrasi kondisi stabil dan tidak stabil	18
Gambar 2.8	Grafik hasil metode continuation power flow	22
Gambar 3.1	Single line diagram IEEE 13 bus	25
Gambar 3.2	Single line diagram IEEE 28 bus	26
Gambar 3.3	Diagram alir simulasi, analisis dan evaluasi sistem	29
Gambar 3.4	Diagram alir analisis dan evaluasi stabilitas tegangan	31
Gambar 3.5	Diagram alir analisis dan evaluasi stabilitas transien	32
Gambar 4.1	Kurva P-V IEEE 13 Bus Tanpa DG	36
Gambar 4.2	Kurva P-V IEEE 13 Bus 1 Unit DG 38%	39
Gambar 4.3	Kurva P-V IEEE 13 Bus 1 Unit DG 45%	40
Gambar 4.4	Kurva P-V IEEE 13 Bus 2 Unit DG 38%	43
Gambar 4.5	Kurva P-V IEEE 13 Bus 2 Unit DG 45%	43
Gambar 4.6	Trajektori generator pusat pembangkitan 38% 1 DG	45
Gambar 4.7	Trajektori generator DG pembangkitan 38% 1 DG	46
Gambar 4.8	Respon sudut rotor pembangkitan 38% 1 DG	47
Gambar 4.9	Trajektori generator pusat pembangkitan 45% 1 DG	47
Gambar 4.10	Trajektori generator DG pembangkitan 45% 1 DG	48
Gambar 4.11	Respon sudut rotor pembangkitan 45% 1 DG	49
Gambar 4.12	Trajektori generator pusat pembangkitan 38% 2 DG	50
Gambar 4.13	Trajektori generator DG pembangkitan 38% 2 DG	50
Gambar 4.14	Respon sudut rotor pembangkitan 38% 2 DG	51
Gambar 4.15	Trajektori generator pusat pembangkitan 45% 2 DG	52
Gambar 4.16	Trajektori generator DG pembangkitan 45% 2 DG	52
Gambar 4.17	Respon sudut rotor pembangkitan 45% 2 DG	53
Gambar 4.18	Kurva P-V IEEE 28 Bus Tanpa DG	56
Gambar 4.19	Kurva P-V IEEE 28 Bus 1 Unit DG 45%	60
Gambar 4.20	Kurva P-V IEEE 28 Bus 1 Unit DG 50%	60
Gambar 4.21	Kurva P-V IEEE 28 Bus 2 Unit DG 45%	64
Gambar 4.22	Kurva P-V IEEE 28 Bus 2 Unit DG 50%	64
Gambar 4.23	Trajektori generator pusat pembangkitan 45% 1 DG	66
Gambar 4.24	Trajektori generator DG pembangkitan 45% 1 DG	67

Gambar 4.25	Respon sudut rotor pembangkitan 45% 1 DG.....	68
Gambar 4.26	Trajektori generator pusat pembangkitan 50% 1 DG ..	68
Gambar 4.27	Trajektori generator DG pembangkitan 50% 1 DG.....	69
Gambar 4.28	Respon sudut rotor pembangkitan 50% 1 DG.....	70
Gambar 4.29	Trajektori generator pusat pembangkitan 45% 2 DG ..	71
Gambar 4.30	Trajektori generator DG pembangkitan 45% 2 DG.....	71
Gambar 4.31	Respon sudut rotor pembangkitan 45% 2 DG.....	72
Gambar 4.32	Trajektori generator pusat pembangkitan 50% 2 DG ..	73
Gambar 4.33	Trajektori generator DG pembangkitan 50% 2 DG.....	73
Gambar 4.34	Respon sudut rotor pembangkitan 50% 2 DG.....	74

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Teknologi dan kapasitas DG	6
Tabel 3.1	Data sistem kelistrikan IEEE 13 bus.....	25
Tabel 3.2	Data sistem kelistrikan IEEE 28 bus.....	27
Tabel 3.3	Spesifikasi Generator Utama.....	28
Tabel 3.4	Spesifikasi DG	28
Tabel 3.5	Skenario level pembangkitan DG.....	28
Tabel 4.1	Hasil simulasi CPF tanpa DG	35
Tabel 4.2	Hasil perhitungan gradien tanpa DG	36
Tabel 4.3	Hasil penentuan lokasi DG pertama IEEE 13 bus	37
Tabel 4.4	Hasil simulasi CPF terhubung 1 unit DG.....	38
Tabel 4.5	Hasil perhitungan gradien terhubung dengan 1 unit DG ...	38
Tabel 4.6	Hasil penentuan lokasi DG kedua IEEE 13 bus	40
Tabel 4.7	Hasil simulasi CPF terhubung 2 unit DG.....	41
Tabel 4.8	Hasil perhitungan gradien saat terhubung 2 unit DG	42
Tabel 4.9	Pengaruh DG terhadap indek tegangan dan rugi daya.....	44
Tabel 4.10	Hasil CCT terhubung 1 unit DG.....	45
Tabel 4.11	Hasil CCT terhubung 2 unit DG.....	49
Tabel 4.12	Hasil simulasi CPF tanpa terhubung DG	54
Tabel 4.13	Hasil perhitungan gradien tanpa terhubung DG	55
Tabel 4.14	Hasil penentuan lokasi DG pertama IEEE 28 bus	57
Tabel 4.15	Hasil simulasi CPF terhubung 1 DG.....	57
Tabel 4.16	Hasil perhitungan gradien terhubung 1 DG	59
Tabel 4.17	Hasil penentuan lokasi DG kedua IEEE 28 bus	61
Tabel 4.18	Hasil simulasi CPF terhubung 2 DG.....	61
Tabel 4.19	Hasil perhitungan gradien saat terhubung 2 DG	62
Tabel 4.20	Pengaruh DG terhadap indek tegangan dan rugi daya.....	65
Tabel 4.21	Hasil CCT terhubung 1 unit DG.....	66
Tabel 4.22	Hasil CCT saat terhubung 2 DG.....	70

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Stabilitas tenaga listrik berhubungan langsung dengan kemampuan suatu sistem tenaga listrik dalam mempertahankan suatu kondisi tertentu terhadap berbagai gangguan yang terjadi[1,2]. Hal tersebut berlaku pada lingkup stabilitas tenaga listrik yang ada di bawahnya, termasuk stabilitas transien dan tegangan. Ketidakmampuan sistem tersebut dalam mempertahankan kondisi stabil dipengaruhi oleh berbagai faktor, diantaranya gangguan hubung singkat, pelepasan beban secara mendadak, permintaan beban yang semakin meningkat, dan level pembangkitan daya dari instalasi generator terdistribusi (DG).

Distributed Generation (DG) merupakan unit pembangkit yang tersebar dan terhubung dengan sistem jaringan distribusi atau transmisi yang memiliki keunggulan disisi teknis, ekonomi, efisiensi, keandalan, kualitas daya dan ramah lingkungan[3]. Semakin banyak DG yang terkoneksi dengan sistem kelistrikan (*grid*) akan berpengaruh terhadap stabilitas sistem tersebut. Selain jumlah DG, besar level pembangkitan daya DG, penempatan pemasangan DG dan jenis DG yang digunakan juga akan mempengaruhi kondisi stabilitas sistem tersebut.

Oleh karenanya, pada tugas akhir ini akan mendalami pengaruh dari kombinasi jenis DG (*hybrid*) terhadap stabilitas transien dan tegangan dari suatu sistem kelistrikan. Evaluasi yang digunakan dalam mengatasi masalah stabilitas transien menggunakan metode simulasi numerik berbasis lintasan kritis yang dapat menentukan waktu pemutus kritis jika terjadi gangguan pada sistem. Sedangkan pada masalah stabilitas tegangan menggunakan *metode continuation power flow* (CPF) dan analisis kurva PV.

Pada tugas akhir ini, jenis DG yang digunakan dalam simulasi dan analisis adalah DG berjenis diesel dan *photovoltaic* saja. Lokasi pemasangan DG tersebut dilakukan menggunakan metode analitik dengan mempertimbangkan 10 bus tersensitif hasil *running* CPF, level pembangkitan DG dan rugi daya aktif sistem bila dipasang pada lokasi tertentu. Dengan demikian stabilitas transien dan tegangan pada suatu sistem dapat dipertahankan pada kondisi normal walaupun banyak faktor yang mempengaruhinya.

1.2 Permasalahan

Permasalahan yang akan diselesaikan pada tugas akhir ini meliputi :

1. Penentuan lokasi pemasangan DG berdasarkan 10 bus tersensitif, level pembangkitan daya aktif DG dan rugi daya aktif sistem.
2. Analisis stabilitas transien akibat gangguan hubung singkat, penambahan jumlah unit DG, jenis DG dan level pembangkitan daya aktif DG.
3. Analisis stabilitas tegangan akibat penambahan beban, jumlah unit DG, jenis DG dan level pembangkitan daya aktif DG.
4. Analisis titik pada sistem kelistrikan yang mudah mengalami jatuh tegangan bila dilakukan penambahan beban.

1.3 Tujuan

Penelitian tugas akhir ini bertujuan untuk :

1. Mendapatkan lokasi pemasangan DG yang memiliki rugi daya aktif sistem terendah bila dipasang DG.
2. Mengetahui kondisi stabilitas transien apabila terjadi gangguan hubung singkat, penambahan jumlah unit DG, jenis DG dan level pembangkitan daya aktif DG.
3. Mengetahui kondisi stabilitas tegangan apabila terjadi penambahan beban, jumlah unit DG, jenis DG dan level pembangkitan daya aktif DG.
4. Mendapatkan dan mengetahui titik pada sistem kelistrikan yang mudah mengalami jatuh tegangan bila dilakukan penambahan beban.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dari tugas akhir ini adalah :

1. Penempatan lokasi DG menggunakan metode analitik dengan mempertimbangkan 10 bus tersensitif, level pembangkitan daya aktif DG dan rugi daya aktif sistem.
2. Penentuan level pembangkitan daya aktif DG tidak melalui optimasi, melainkan pemenuhan profil tegangan yang baik (0,95 – 1,05 pu).
3. Besar pembangkitan daya reaktif DG tergantung pada faktor daya yang digunakan oleh DG tersebut. Khusus photovoltaic, pemodelan suplai ke sistem setelah melalui PV inverter dengan besar pembangkitan dan faktor daya yang telah ditentukan.

4. Injeksi daya DG terhadap sistem dianggap konstan.
5. Analisis stabilitas transien minimal terhubung dengan 2 unit generator sinkron serta mengabaikan pengaruh governor, *damping*, dan tidak terhubung dengan *infinite bus*.
6. Bus tersensitif ditentukan oleh metode *continuation power flow* (CPF).
7. Analisis stabilitas transien dan tegangan mengabaikan sistem kontrol dan karakteristik rating peralatan.
8. Sistem kelistrikan yang digunakan adalah IEEE 13 bus dan IEEE 28 bus disimulasikan menggunakan software Matlab R2015a dengan pemodelan aliran daya aktif menggunakan *PQ model*.

1.5 Metodologi

Metodologi yang digunakan dalam penyusunan tugas akhir ini sebagai berikut:

1. Studi pustaka
Pada tahap ini, hal yang dilakukan adalah membaca dan mempelajari jurnal, proceeding dan buku-buku literatur berkaitan dengan topik tugas akhir yang bersumber dari *website* IEEE, *Science Direct*, *researchgate* dan berbagai referensi buku elektronik.
2. Menjalankan simulasi :
 - a. Simulasi aliran daya menggunakan metode *backward forward sweep*.
 - b. Menjalankan program *continuation power flow* untuk menentukan 10 bus tersensitif.
 - c. Menentukan lokasi pemasangan bus mempertimbangkan 10 bus tersensitif, level pembangkitan daya aktif DG, dan rugi daya aktif sistem.
 - d. Pemasangan DG pada bus terpilih, kemudian menjalankan program CPF dan metode simulasi numerik berbasis lintasan kritis.
3. Menganalisis stabilitas tegangan akibat penambahan beban, jumlah unit DG, jenis DG dan level pembangkitan daya aktif DG.
4. Menganalisis stabilitas transien akibat gangguan hubung singkat, penambahan jumlah unit DG, jenis DG dan level pembangkitan daya aktif DG.
5. Pembuatan laporan tugas akhir

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam tugas akhir ini terdiri atas lima bab dengan uraian sebagai berikut :

Bab 1 : Pendahuluan

Pada bab ini dijelaskan latar belakang pengambilan topik tugas akhir ini, kemudian dijelaskan permasalahan beserta batasannya, tujuan, metodologi penyelesaian tugas akhir, sistematika penulisan laporan tugas akhir, serta relevansi dari topik yang dikerjakan dalam tugas akhir ini.

Bab 2 : Tinjauan Pustaka

Pada bab ini dijelaskan teori yang berkaitan dengan topik tugas akhir ini. Teori tersebut bersumber dari jurnal, proceeding ataupun buku elektronik.

Bab 3 : Perancangan dan Pemodelan

Pada bab 3 ini dijelaskan tentang pemodelan sistem yang akan diuji, data pendukung simulasi dan perancangan program simulasi yang digunakan untuk analisis dan evaluasi.

Bab 4 : Hasil Simulasi dan Analisa

Bab 4 ini menjelaskan terkait hasil simulasi secara lengkap dan analisis hasil simulasi yang informatif.

Bab 5 : Penutup

Pada bab ini dijelaskan tentang kesimpulan dan saran dari penulis terkait topik tugas akhir yang telah dikerjakan.

1.7 Relevansi

Relevansi simulasi dan pemodelan pengaruh *hybrid* DG terhadap stabilitas transien dan tegangan yaitu dapat dijadikan sebagai acuan dalam melakukan *setting* proteksi, penentuan lokasi pemasangan DG yang menghasilkan rugi daya aktif sistem terkecil, kemampuan maksimum penambahan beban yang dapat ditanggung oleh sistem, dan dampak dari pemasangan instalasi DG pada sistem. Selain itu dapat dijadikan sebagai referensi topik tugas akhir selanjutnya dan dapat dikembangkan menggunakan metode yang lebih mutakhir di tahun-tahun yang akan datang.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

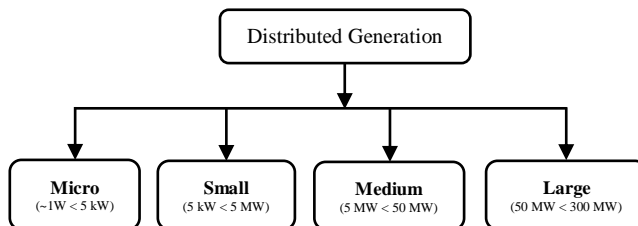
2.1 Distributed Generation (DG)

International Energy Agency, menyatakan bahwa *Distributed Generation* (DG) merupakan suatu unit yang dapat menghasilkan energi listrik di sisi pelanggan maupun jaringan distribusi utilitas dan tidak mengacu pada besar kapasitas. Sedangkan menurut IEEE, DG merupakan pembangkit listrik dengan fasilitas yang tidak lebih besar dari pembangkit pusat dan memungkinkan interkoneksi dengan sistem pada semua titik. Definisi lain lahir dari organisasi internasional industri yang bernama CIGRE, menyatakan bahwa DG merupakan suatu pembangkit listrik dengan kapasitas maksimum 50 MW hingga 100 MW, dan terhubung dengan jaringan distribusi yang tidak dikirim ataupun direncanakan terpusat[3].

Beberapa negara memberikan istilah DG yang berbeda-beda. Di amerika utara, DG dikenal sebagai *Disperged Generation*. Di negara-negara amerika selatan menyebutnya sebagai *Embedded Generation*. Sedangkan di eropa dan beberapa negera di asia, DG dikenal sebagai *Decentralized Generation*[4].

Dari beberapa difinisi diatas, DG dapat diartikan sebagai pembangkit tenaga listrik skala kecil yang bukan bagian dari pembangkit pusat yang besar dan letaknya dekat dengan beban atau konsumen yang bertujuan untuk menekan biaya operasional utilitas distribusi[3].

Hingga saat ini, DG telah memberikan manfaat dan keuntungan diantaranya memiliki fleksibelitas dalam respon harga, kebutuhan keandalan sistem, kebutuhan kualitas daya, ramah lingkungan, dan investasi energi pada *grid*[3]. Manfaat di atas merupakan penjabaran dari sudut pandang ekonomis dan operasional[4]. Jika ditinjau dari kapasitasnya, DG dapat dibedakan menjadi beberapa tipe. Pengklasifikasian tersebut dapat dilihat pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Tipe DG berdasarkan kapasitas[4]

Selain itu, para praktisi menunjukkan bahwa teknologi dari DG sangat bervariasi. Deskripsi dan analisis teknis mengenai status masing-masing teknologi dapat dilihat pada tabel 2.1.

Tabel 2.1 Teknologi dan kapasitas DG[5]

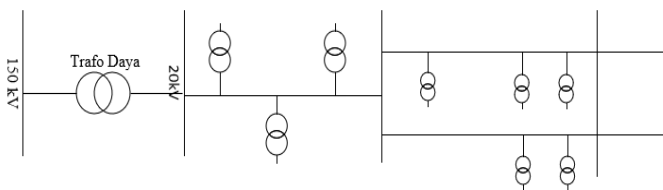
Teknologi DG	Kapasitas DG
<i>Conventional</i>	
Combine Cycle Gas Turbine	35 KW – 400 MW
Internal Combustion Turbine	5 KW – 10 KW
Combustion Turbine	1 MW – 250 MW
Micro Turbines (MT)	35 KW-1 MW
<i>Renewable</i>	
Small Hydro	1 – 100 MW
Micro Hydro	25 KW – 1 MW
Wind Turbine (WT)	200 W- 3MW
Photovoltaic Array (PV)	20 W- 100 KW
Solar terminal, central receiver	1 MW- 80 MW
Solar terminal, Lutz system	10 MW – 80 MW
Biomass, e.g. based in gasification	100 KW – 20 MW
Fuel cells, phosacid	200 KW – 2 MW
Fuel cells, molten carbonate	250 KW – 2 MW
Fuel cells, proton exchange	1 KW – 2 MW
Fuel cells, solid oxide	250 KW – 5 MW
Geothermal	5 – 100 MW
Ocean Energy	100 KW – 1 MW
Stirling Engine	2 – 10 KW
Battery Storage	500 KW- 5 MW

Teknologi DG dapat berpengaruh terhadap stabilitas tenaga listrik apabila dihubungkan dengan sistem tenaga listrik. Pada kasus stabilitas transien, waktu pemutus singkat (*critical clearing time*) sebagian besar meningkat seiring bertambahnya penggunaan jumlah DG. Sedangkan pada kasus stabilitas tegangan, penambahan DG pada sistem akan memperbaiki indek tegangan, mengurangi kecuraman gradien, dan memperbesar nilai *maximum load point* (MLP). Penelitian tersebut menggunakan sistem mesh IEEE 30 Bus dengan DG berteknologi generator sinkron[6].

Hybrid DG merupakan kombinasi dua atau lebih dari teknologi DG yang berbeda dan terhubung menjadi satu kesatuan sistem tenaga listrik dalam menyediakan listrik untuk pelanggan[7]. Penggunaan hybrid DG ini akan memberikan pengaruh juga terhadap stabilitas tenaga listrik, karena setiap teknologi DG mempunyai karakteristik yang berbeda-beda.

2.2 Sistem Distribusi Radial

Dalam proses penyaluran daya menuju beban atau konsumen, sistem distribusi yang umum digunakan adalah sistem distribusi radial. Sistem ini merupakan sistem yang cukup sederhana karena saluran ditarik secara lurus sehingga terbagi menjadi dua bagian yaitu hulu (penyulang) dan hilir (beban). Karakteristik dari sistem distribusi ini yaitu strukturnya radial, *ratio* perbandingan resistansi dan reaktansi tinggi, serta kompleksitas sistem[3]. Ilustrasi dari sistem ini dapat dilihat pada gambar 2.2



Gambar 2.2 Sistem Distribusi Radial

Penggunaan sistem distribusi radial ini memiliki beberapa keunggulan [8], diantaranya :

- Pengamanan terhadap arus gangguan lebih mudah
- Arus gangguan lebih kecil
- Pengaturan tegangan lebih mudah

- d. Mudah dalam peramalan dan pengaturan aliran daya
- e. Biaya relatif murah

2.3 Penempatan DG berdasarkan Metode Analitik

Dalam tahap penentuan lokasi *distributed generation* (DG) dilakukan perhitungan nilai TPloss menggunakan persamaan dibawah ini :

$$TPloss_{dg} = \sum_{n=2}^i \frac{r_{n-1}}{V_n^2} \left[(P_n - P_{dgi})^2 + (Q_n - P_{dgi} \tan \phi_i)^2 \right] + \sum_{n=1+1}^i \frac{r_{n-1}}{V_n^2} [P_n^2 + TQ_n^2] \quad (2.1)$$

Dengan formulasi diatas akan didapatkan lokasi yang memiliki rugi daya aktif sistem terkecil apabila dilakukan pemasangan DG pada lokasi tersebut [9,10]. Guna mengevaluasi parameter lain seperti profil tegangan maka dilakukan analisis aliran daya. Jika hasil nilai tegangan belum memenuhi *constraint* yang telah ditentukan maka prosentase suplai daya aktif DG akan dinaikkan, kemudian akan ditentukan lokasi pemasangannya menggunakan metode tersebut. Hal tersebut akan terus dilakukan hingga hasil nilai tegangan memenuhi *constraint* yang telah ditentukan.

2.4 Analisis Aliran Daya

Untuk mendapatkan informasi terkait kualitas sistem maka analisis aliran daya sangat diperlukan. Dengan analisis ini maka akan mudah diketahui kualitas sistem tersebut yang meliputi daya aktif, daya reaktif, besar tegangan, deviasi tegangan, faktor daya, sudut fasa dan rugi daya sistem. Besaran tersebut merupakan parameter yang ada pada bus, saluran dan sistem secara keseluruhan. Adapun jenis bus[6,11], berdasarkan besaran yang ada di dalamnya, yaitu :

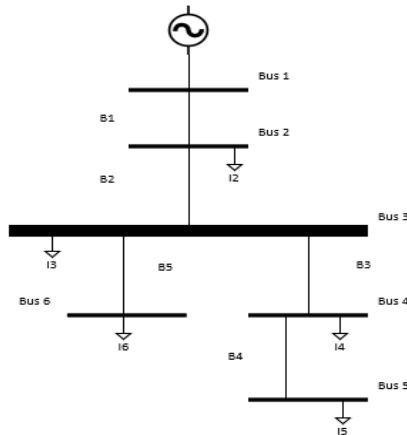
- a. *Slack / swing bus*, tegangan pada bus ini besarnya konstan dan nilai sudut fasanya 0°, sehingga bus ini dijadikan sebagai referensi tegangan dan sudut fasa oleh bus yang lain.
- b. Bus generator, biasa dikenal dengan *PV bus*. Karena pada bus ini terdapat dua besaran utama yaitu tegangan dan daya aktif. Fungsi dari bus ini adalah menjaga regulasi tegangan, karena pada bus ini besar suplai daya reaktif dapat diatur dengan batas maksimum dan minimumnya.

- c. Bus beban, dikenal dengan *PQ bus*. Pada bus ini besaran yang diketahui adalah daya aktif dan reaktif. Dua besaran tersebut merepresentasikan daya aktif dan reaktif beban yang ada pada bus tersebut.

Ilustrasi dari sistem distribusi radial dapat dilihat pada gambar 2.3 di bawah ini.

2.4.1 Analisis Aliran Daya Pasif

Analisis aliran daya pasif[11] pada sistem distribusi menggunakan metode *backward forward sweep*. Metode tersebut ideal diaplikasikan pada sistem ini mengingat cabang dan beban yang cukup banyak serta *ratio* perbandingan nilai resistansi dan reaktansi yang tinggi. Metode ini memiliki dua mekanisme sapuan (*sweep*) utama, yaitu *backward sweep* dan *forward sweep*. *Backward sweep* bertujuan untuk menghitung arus yang mengalir dari beban paling ujung sampai slack bus. Sedangkan *forward sweep* berperan menghitung deviasi tegangan dengan cara mengalirkan besar arus yang telah dihitung dengan impedansi saluran.



Gambar 2.3 Contoh *single line diagram* sistem radial

Untuk menghitung arus cabang didapatkan dari rumus hubungan antara daya kompleks dan tegangan pada setiap bus, seperti rumus dibawah ini :

$$I_m^n = \text{conj} \left(\frac{P_m + jQ_m}{V_m^n} \right) \quad (2.2)$$

Dimana :

I_m^n = Arus bus m saat iterasi ke- n

V_m^n = Tegangan bus m saat iterasi ke- n

Guna memudahkan perhitungan, maka dibutuhkan modifikasi perhitungan berupa matriks BIBC (*Bus Injection to Branch Current*) pada metode *Backward-Forward Sweep*. Matriks tersebut merepresentasikan hubungan antara arus dan saluran pada suatu sistem kelistrikan. Dengan menggunakan *kirchoff current law*, maka persamaan untuk membangun matriks BIBC berdasarkan *single line diagram* gambar 2.3 dapat modelkan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} B_5 &= I_6 \\ B_4 &= I_5 \\ B_3 &= I_4 + I_5 \\ B_2 &= I_3 + I_4 + I_5 + I_6 \\ B_1 &= I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6 \end{aligned} \quad (2.3)$$

Dimana :

B_n = Arus Saluran Bus n

I_n = Arus Cabang n

Persamaan (2.3) merupakan persamaan arus cabang (I) terhadap bus (B), dimana persamaan tersebut akan dibentuk matriks BIBC seperti berikut :

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$[B] = [\mathbf{BIBC}][I] \quad (2.5)$$

Adanya hubungan antara arus dan saluran pada sistem dinotasikan dengan angka 1, sedangkan ketidakhadanya hubungan antara arus dan saluran pada sistem dinotasikan dengan angka 0. Matriks yang elemennya angka 1 & 0 disebut dengan matriks BIBC.

Selanjutnya, penentuan besar deviasi tegangan pada setiap bus dilakukan dengan mengkalikan nilai impedansi saluran dengan nilai arus yang telah dihitung sebelumnya. Proses ini dikenal dengan istilah *forward sweep*. Proses kalkulasi ini dapat dilihat pada persamaan (2.6).

$$\begin{aligned}
 V_2 &= V_1 - B_1 \cdot Z_{12} \\
 V_3 &= V_1 - B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} \\
 V_4 &= V_1 - B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_3 \cdot Z_{34} \\
 V_5 &= V_1 - B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_3 \cdot Z_{34} - B_4 \cdot Z_{45} \\
 V_6 &= V_1 - B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_3 \cdot Z_{34} - B_4 \cdot Z_{45} - B_5 \cdot Z_{26}
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

Dimana :

$$\begin{aligned}
 V_n &= \text{Tegangan Bus } n \\
 B_n &= \text{Arus Saluran Bus } n \\
 Z_{k-l} &= \text{Impedansi Saluran dari bus } k \text{ ke bus } l
 \end{aligned}$$

Selanjutnya adalah membangun matriks BCBV (*Branch Current to Branch Voltage*) dengan cara menurunkan persamaan (2.6) menjadi sebuah persamaan matriks sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} V_1 - V_2 \\ V_1 - V_3 \\ V_1 - V_4 \\ V_1 - V_5 \\ V_1 - V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & Z_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} \tag{2.7}$$

$$[\Delta V] = [BCBV][B] \tag{2.8}$$

Dimana :

$$\begin{aligned}
 V_n &= \text{Tegangan Bus } n \\
 B_n &= \text{Arus Saluran Bus } n \\
 Z_{k-l} &= \text{Impedansi Saluran dari bus } k \text{ ke bus } l \\
 \Delta V &= \text{Drop Tegangan antara } V_k \text{ ke } V_l
 \end{aligned}$$

Distribution Load Flow (DLF) merupakan hasil Operasi perkalian antara matriks BCBV dengan BIBC akan disederhanakan menjadi

matriks DLF (*Distribution Load Flow*). Fungsinya adalah untuk memudahkan perhitungan dalam mendapatkan deviasi tegangan (ΔV). Penyederhanaan persamaan yang didapat adalah sebagai berikut :

$$[\Delta V] = [BCBV][BIBC][I] \quad (2.9)$$

$$[\Delta V] = [DLF][I] \quad (2.10)$$

Dengan didapatkannya matriks BIBC, BCBV dan ΔV , tegangan pada setiap bus dapat dihitung menggunakan persamaan dibawah ini :

$$[V_i] = [V_1] - [\Delta V] \quad (2.11)$$

Dimana :

- ΔV = Drop Tegangan antara V_k ke V_l
- BCBV = Matriks *Branch Current to Branch Voltage*
- BIBC = Matriks *Bus Injection to Branch Current*
- DLF = Matriks *Distribution Load Flow*
- V_i = Tegangan Saluran Bus i

2.4.2 Analisis Aliran Daya Aktif

Adanya konektivitas DG pada sistem kelistrikan menyebabkan proses pengaliran daya tidak berasal dari satu sumber saja, melainkan dari dari sumber lain (DG) yang terhubung pada suatu bus pada sistem tersebut. Dalam mempermudah perhitungan, maka sumber lain tersebut dimodelkan dengan negatif PQ bus atau PV bus.

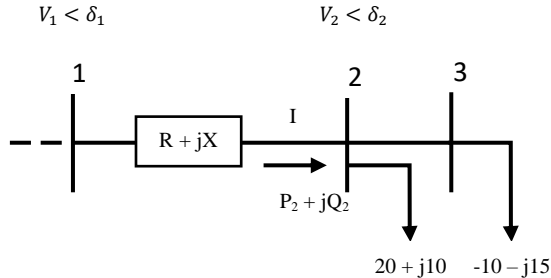
PQ model digunakan untuk memodelkan generator yang terpasang pada sistem distribusi (DG) menjadi beban negatif. Hal ini terjadi karena karakteristik dari generator yang berlawanan dengan karakteristik beban. Beban memiliki karakteristik menyerap daya sedangkan generator menyuplai daya, perbedaan aliran (menyerap dan menyuplai) dari keduanya inilah yang melahirkan pemodelan negatif PQ bus. Persamaan negatif PQ bus adalah sebagai berikut :

$$P = - P_s \quad (2.12)$$

$$Q = - Q_s \quad (2.13)$$

Agar lebih jelas, persamaan di atas akan dirinci pada contoh di bawah ini beserta ilustrasi gambarnya. Ketika pada bus 3 dipasang DG dengan kapasitas $10 + j5$, total beban yang terpasang pada bus 2 akan

mempertimbangkan adanya DG pada bus 3 menjadi $20 + j10 - 10 - j5 = 10 + j5$. Jika DG pada bus 3 diganti dengan beban yang mempunyai nilai yang sama, maka total beban yang terpasang adalah $20 + j10 + 10 + j5 = 30 + j15$.



Gambar 2.4 Ilustrasi pemodelan negatif PQ bus

Bus yang terhubung DG akan berperan sebagai beban negatif. Beban negatif tersebut akan berfungsi sebagai generator karena memiliki arah aliran daya yang berlawanan dengan beban. Kelemahan dari pemodelan ini yaitu DG tidak memiliki kapabilitas dalam meregulasikan daya reaktif generator. Hal tersebut yang mengakibatkan tegangan keluaran tidak dapat dipertahankan pada kondisi tertentu.

Kelemahan dari pemodelan tersebut dapat diatasi dengan pemodelan PV bus. Dengan pemodelan ini, besar daya reaktif yang disuplai generator dapat diketahui, sehingga tegangan sistem dapat dijaga pada kondisi tertentu. Semakin tinggi suplai daya reaktif, maka besar tegangan akan semakin naik, demikian sebaliknya[9].

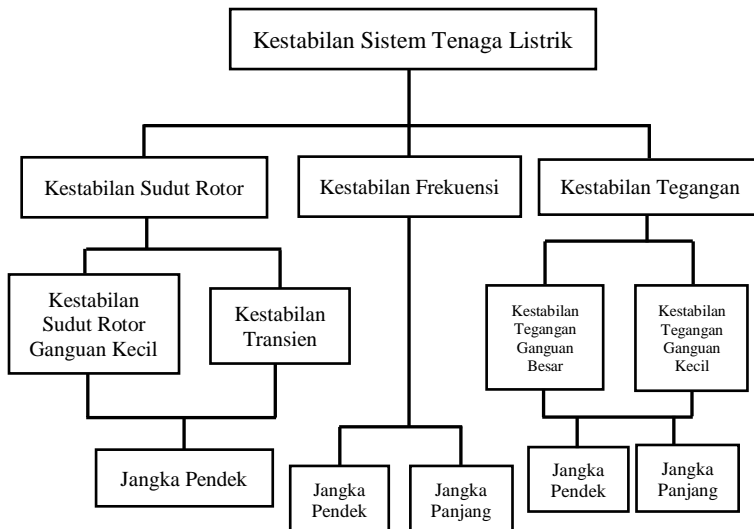
2.5 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

Kestabilan sistem tenaga listrik merupakan kemampuan sistem tenaga listrik dengan kondisi operasi awal yang telah diinisialisasikan untuk mempertahankan kondisi normalnya pada titik keseimbangan saat ataupun setelah mengalami gangguan, sehingga keutuhan dan keberlangsungan dari sistem tetap terjaga[1,2]. Berdasarkan sifat dan besarnya gangguan, analisis stabilitas secara umum digolongkan menjadi tiga, yaitu :

1. Kestabilan Keadaan Tetap (*Steady State Stability*)
2. Kestabilan Dinamis (*Dynamic Stability*)

3. Kestabilan Transien (*Transient Stability*)

Pengklasifikasian stabilitas tersebut berdasarkan pertimbangan seperti sifat fisik dari hasil ketidakstabilan, pertimbangan ukuran gangguan, pertimbangan perangkat, proses dan rentang waktu dalam menentukan stabilitas, metode perhitungan dan prediksi stabilitas yang tepat. Secara umum stabilitas tenaga listrik dibagi menjadi 3 yaitu, stabilitas sudut rotor, frekuensi dan tegangan [6,13]. Diagram klasifikasi stabilitas tenaga listrik dapat dilihat pada gambar 2.5.



Gambar 2.5 Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga Listrik[1]

2.5.1 Stabilitas Sudut Rotor

Stabilitas sudut rotor bertumpu pada kemampuan dari mesin sinkron untuk tetap berhubungan dalam kondisi sinkron pada saat dan setelah gangguan terjadi. Orientasi kemampuan tersebut adalah mempertahankan ataupun mengembalikan hubungan antara torsi elektromagnetik dan torsi mekanik setiap mesin sinkron dalam sistem pada titik keseimbangan. Bentuk dari ketidakstabilan sudut rotor adalah

peningkatan besar ayunan sudut beberapa generator yang menyebabkan lepas sinkron dengan generator yang lain[1].

2.5.2 Stabilitas Frekuensi

Stabilitas frekuensi mengacu pada kemampuan suatu sistem dalam mempertahankan frekuensi setelah mengalami gangguan yang cukup besar. Akibat dari ketidakstabilan ini adalah perubahan frekuensi keberlanjutan yang berakibat kegagalan operasi dari sisi pembangkit ataupun beban[1].

2.5.3 Stabilitas Tegangan

Stabilitas tegangan mengacu pada kemampuan dalam menjaga level tegangan setiap bus pada kondisi yang diijinkan disaat atau setelah terjadinya gangguan. Gangguan yang dapat mengancam stabilitas ini adalah hilangnya sebagian beban secara mendadak, lepasnya sinkronisasi generator dari sistem, gangguan sistem transmisi. Efek nyata dari gangguan stabilitas ini adalah naik atau turunnya tegangan pada beberapa bus secara signifikan [1].

2.6 Analisis Stabilitas Transien berdasarkan Pemodelan Sistem

Pemodelan sistem tenaga listrik[2] tanpa terhubung *infinite bus* dinotasikan menggunakan Xd' model generator. Setiap generator terdiri dari dua persamaan diferensial. Dalam simulasi *numerical simulation method* menggunakan Centre of Angle (COA) dari persamaan ayunan. Persamaan tersebut disajikan di bawah ini :

$$M_i \ddot{\omega}_i = P_{mi} - P_{ei}(\theta) - \frac{M_i}{M_T} P_{COA} - D_i(\widetilde{\omega}_i) \quad (2.14)$$

$$\dot{\theta}_i = \widetilde{\omega}_i \quad (2.15)$$

Dimana:

$$M_T = \sum_{i=1}^n M_i ; \omega_0 = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^n M_i \omega_i ; \delta_0 = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^n M_i \delta_i ; \quad (2.16)$$

$$\theta_i = \delta_i - \delta_0 ; \widetilde{\omega}_i = \omega_i - \omega_0 ; P_{COA} = \sum_{i=1}^n (P_{mi} - P_{ei}(\theta)) ; \quad (2.17)$$

$$P_{ei}(\theta) = \sum_{j=i}^n Y_{ij} E_i E_j \sin(\theta_i - \theta_j + a_{ij}) \quad (2.18)$$

Keterangan:

- P_{mi} : Daya mekanis
- ω_i : Kecepatan sudut generator
- θ_i, δ_i : Sudut rotor generator
- M_i : Momen inersia
- D_i : Koefisien redaman
- E_i : Tegangan generator
- P_{ei} : Daya elektrik
- M_T : Total momen inersia

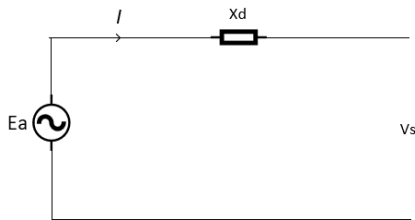
Ketika sistem terhubung dengan *infinite bus*, maka pemodelan sistem seperti pada persamaan 2.19:

$$M\dot{\omega} = P_m - P_e(\delta) \quad (2.19)$$

Keterangan:

- M_T : Momen inersia
- $\dot{\omega} = \frac{d\omega}{dt}$: Percepatan sudut
- P_m : Daya mekanis
- P_e : Daya elektrik

Pemodelan generator pada gambar 2.5 digunakan untuk mencari besar nilai daya mekanik (P_m) dan daya elektrik (P_e).



Gambar 2.6 Pemodelan generator

Dari gambar 2.5 didapat persamaan:

$$E_a = jx'_d \cdot I + V_t \quad (2.20)$$

$$I = \frac{S}{V} \quad (2.21)$$

$$S = P - jQ \quad (2.22)$$

Dengan substitusi persamaan 2.21 kedalam persamaan 2.20, maka didapatkan :

$$E_a = jx'_d \cdot \frac{S}{V} + V_t \quad (2.23)$$

Untuk daya mekanik (P_m) generator didapat melalui:

$$P_m = E_a^* \cdot Y_{red_pre} \cdot E_a \quad (2.24)$$

Dan daya elektrik (P_e) generator didapat melalui:

$$P_e = v \cdot (Y_{red_post} \cdot v)^* \quad (2.25)$$

Perbedaan dari pemodelan mesin tunggal dengan infinite bus ada pada nilai momen inersia dan reaktansi transien. Pada mesin tunggal dimodelkan dengan besar momen inersia dan reaktansi transien tertentu, sedangkan pada infinite bus dimodelkan dengan momen inersia yang sangat besar (kokoh) dan tidak memiliki reaktansi transien. Pemodelan ini hanya mempertimbangkan dua besaran saja, sedangkan besaran yang berkaitan dengan redaman, governor, dan sistem kontrol diabaikan.

2.7 Persamaan Ayunan (Swing Equation)

Prinsip dalam dinamika[6,2,14] menyatakan bahwa ”momen putar percepatan (*accelerating torque*) adalah hasil kali momen kelembaban (*moment of inertia*) rotor dan percepatan sudutnya”. Berdasarkan prinsip tersebut, maka persamaan dalam mengatur gerakan rotor mesin serempak dinamakan persamaan ayunan. Persamaan ini merupakan model matematis yang mengilustrasikan dinamika sistem tenaga listrik saat gangguan besar terjadi. Persamaan ayunan untuk generator serempak sebagai berikut :

$$J = \frac{d^2\theta}{dt^2} = T_m - T_e \quad (2.26)$$

Keterangan :

J : Momen inersia dari massa rotor ($kg\cdot m$)

θ_m : Perubahan sudut rotor terhadap axis stasioner (rad)

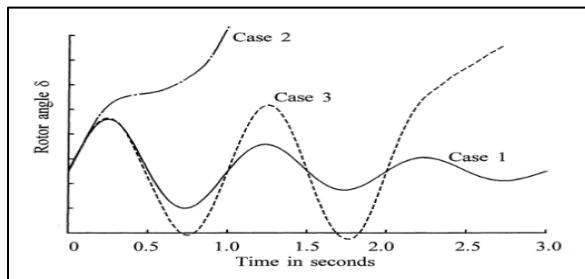
t : Waktu (s)

T_m : Momen putar mekanis ($N\cdot m$)

T_e : Momen putar elektris ($N\cdot m$)

Percepatan ($T_m > T_e$) atau perlambatan ($T_m < T_e$) terjadi apabila gangguan terjadi setelah kondisi *steady state*.

Perubahan putaran rotor dapat mengakibatkan hilangnya sinkronisasi jika gangguan tidak dibersihkan secara cepat. *Transient stability study* menyebutkan bahwa pembersihan dilakukan dalam kurun waktu 3-5 detik setelah gangguan, sedangkan pada sistem yang sangat besar waktu tersebut dapat diperpanjang menjadi 10-20 detik.



Gambar 2.7 Ilustrasi kondisi stabil dan tidak stabil[13]

Gambar 2.7 mengilustrasikan kondisi stabil dan tidak stabil suatu generator sinkron. Pada *case 1* memperlihatkan kondisi stabil, dimana sudut rotor terus meningkat hingga pada akhirnya mengalami osilasi yang terus mengecil hingga mencapai kondisi *steady-state*. *Case 2* memperlihatkan kondisi *first swing instability*, sudut rotor terus bertambah hingga generator lepas sinkron. Pada *case 3* terdapat fenomena *multi swing instability*, osilasi pada generator akhirnya membesar dan menyebabkan generator menjadi hilang sinkronisasi.

2.8 Metode Reduksi Kron

Demi kemudahan alur perhitungan terhadap stabilitas transien pada sistem multimesin maka digunakanlah reduksi matrik yang biasa disebut dengan metode reduksi kron[2,6].

Metode tersebut mereduksi matrik admitansi yang bernilai 0 karena tidak adanya arus yang masuk ataupun keluar pada bus tertentu.

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \\ I_{m+n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1(m+n)} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2(m+n)} \\ Y_{n1} & Y_{nn} & \dots & Y_{n(m+n)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{(m+n)1} & Y_{(m+n)1} & \dots & Y_{(m+n)(m+n)} \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Persamaan 2.27 dapat dengan sederhana ditulis sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} I_n \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_n & Y_m \\ Y_{nm}^t & Y_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_n \\ E_m \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Dimana, n menunjukan bus beban dan m menunjukan bus generator. Dikarenakan tidak adanya arus yang mengalir pada bus beban, maka:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_n & Y_m \\ Y_{nm}^t & Y_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_n \\ E_m \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Dari persamaan 2.29 didapat:

$$Y_n V_n + Y_{nm} E_m = 0 \quad (2.30)$$

$$V_n = - \left(\frac{Y_{nm} E_m}{Y_n} \right) = -(Y_n^{-1} Y_{nm} E_m) \quad (2.31)$$

$$Y_{nm}^t V_n + Y_{mm} E_m = I_m \quad (2.32)$$

Dengan substitusi persamaan 2.31 kedalam persamaan 2.32, didapat:

$$I_m = Y_{nm}^t (-Y_n^{-1} Y_{nm} E_m) + Y_{mm} E_m \quad (2.33)$$

$$I_m = (-Y_{nm}^t Y_n^{-1} Y_{nm} E_m) + Y_{mm} E_m \quad (2.34)$$

$$Y_{reduksi} = Y_{mm} - Y_{nm}^t Y_n^{-1} Y_{nm} \quad (2.35)$$

$$I_m = Y_{reduksi} E_m \quad (2.36)$$

Dengan penyederhanaan tersebut, perhitungan dan analisis stabilitas transien pada sistem multimesin akan lebih mudah.

2.9 Metode Runge-Kutta Orde 4

Pengembangan solusi dari deret taylor merupakan inisiasi lahirnya metode runge-kutta. Pembeda sekaligus kelebihan dari metode ini adalah tidak memerlukan evaluasi eksplisit dari turunan yang lebih tinggi daripada turunan pertamanya. Memasukkan beberapa evaluasi dari turunan pertama merupakan efek dari adanya turunan yang lebih tinggi.

Dalam metode runge-kutta orde 4[2,6], pencarian nilai x dengan step $(n + 1)^{st}$ sebagai berikut:

$$x_{n+1} = x_n + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (2.37)$$

Dimana :

$$k_1 = f(x_n, t_n) \Delta t \quad (2.38)$$

$$k_2 = f\left(x_n + \frac{k_1}{2}, t_n + \frac{\Delta t}{2}\right) \Delta t \quad (2.39)$$

$$k_3 = f\left(x_n + \frac{k_2}{2}, t_n + \frac{\Delta t}{2}\right) \Delta t \quad (2.40)$$

$$k_4 = f(x_n + k_3, t_n + \Delta t) \Delta t \quad (2.41)$$

$$\Delta x = \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (2.42)$$

Keterangan:

k_1 : (slop pada saat awal time step)* Δt

k_2 : (pendekatan pertama pada slop saat pertengahan step)* Δt

k_3 : (pendekatan kedua pada slop saat pertengahan step)* Δt

k_4 : (slop pada saat akhir time step)* Δt

2.10 Waktu Pemutus Kritis (CCT)

Guna mengisolasi gangguan agar tidak menyebar pada seluruh sistem, maka pembukaan *circuit breaker* (CB) saluran ataupun generator harus kurang dari waktu pemutus kritisnya. Waktu pemutus kritis ini biasa disebut dengan *critical clearing time* (CCT). Tujuan pemutusan sebelum waktu pemutus kritis adalah untuk menjaga sistem agar tetap atau kembali

pada kondisi stabilnya, namun apabila pemutusan dilakukan setelah waktu pemutus kritisnya dapat dipastikan generator akan kehilangan sinkronisasinya[6].

2.11 Analisis Stabilitas Tegangan berdasarkan Kurva P-V

Karakteristik tegangan terhadap perubahan beban daya aktif yang semakin meningkat dapat direpresentasikan melalui kurva P-V. Penambahan beban pada suatu bus terus dilakukan hingga tegangan pada suatu bus diketahui titik kritisnya. Dengan mengetahui titik kritis tersebut, maka gangguan jatuh tegangan (*voltage collapse*) dapat diantisipasi.

2.12 Tegangan Jatuh

Seiring kenaikan jumlah beban pada suatu sistem kelistrikan maka akan mempengaruhi tegangan jatuh (*voltage collapse*) dari sistem tersebut. Akibat fatal dari gangguan ini adalah terjadinya pemadaman atau tegangan akan beroperasi di bawah batas keamanannya. Penyebab terjadinya tegangan jatuh yang utama adalah peningkatan beban yang secara terus menerus. Gangguan tersebut berdampak pada sisi produksi, konsumsi dan penyaluran daya. Antisipasi yang perlu dilakukan adalah dengan kapasitor bank dan pembatasan pemasangan beban.

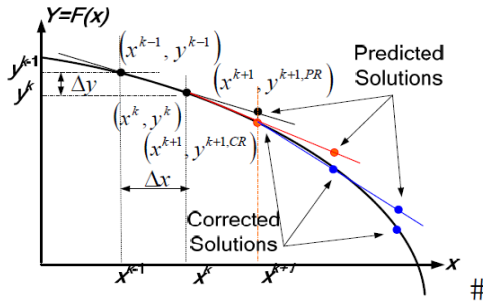
2.13 Continuation Power Flow Method[15,16]

Pada umumnya, metode *continuation power flow* menggunakan metode newton raphson dalam analisis aliran daya. Hasil aliran daya tersebut akan digunakan dalam pembentukan kurva P-V terhadap penambahan beban secara *continue*. Namun penggunaan metode newton raphson menyebabkan matriks jacobian tidak singular, yang berakibat sulitnya dalam proses perhitungan. Jika sistem yang digunakan adalah radial yang memiliki ratio perbandingan resistansi dan reaktansi yang besar, maka penggunaan metode newton raphson akan tidak konvergen. Hal tersebut akan berakibat pada ketidakstabilan kurva P-V yang dihasilkan.

Untuk mengantisipasi masalah tersebut, maka perhitungan *continuation power flow* dibantu dengan *first-order polynomial secant predictor* dan hasilnya akan dikoreksi menggunakan metode *backward-forward sweep*. Keuntungan penggunaan metode ini antara lain, masalah singularitas matriks dapat diatasi, efisien dalam menangani sistem dengan beban tidak seimbang dan ratio perbandingan resistansi dan reaktansi

yang besar, waktu iterasi lebih cepat dalam mengatasi sistem tiga fasa tidak seimbang.

Metode ini dapat menghitung kurva bagian stabil dan tidak stabil secara bersamaan hingga bertemu pada *Maximum Loading Point* (MLP). Bagian stabil diselesaikan dengan *secant predictor* menggunakan *first order polynominal* dalam memprediksikan langkah selanjutnya, kemudian akan dikoreksi oleh *backward-forward sweep*. Keandalan *backward-forward sweep* dapat mengatasi kesulitan dalam menemukan MLP, hasilnya lebih akurat dan metode yang lebih sederhana.



Gambar 2.8 Grafik hasil metode *continuation power flow*[16]

2.13.1 Predictor Step

Pada metode *Continuation Power Flow*, teknik *secant predictor* digunakan untuk menghitung bagian yang stabil. Dua titik pertama akan dihitung menggunakan *backward-forward sweep*. Hasil perhitungan ini digunakan untuk memprediksikan titik ketiga yang akan digunakan sebagai *initial point* pada solusi aliran daya untuk menemukan hasil koreksi. Teknik ini bertujuan untuk mempercepat proses iterasi antara *predictor* dan *corrector*. Untuk mendapatkan 2 titik pertama (x^{k-1}, y^{k-1}) dan (x^k, y^k) pada Gambar 2.8 ditunjukkan pada persamaan dibawah ini :

$$SL = \frac{y^k - y^{k-1}}{x^k - x^{k-1}} = \frac{\Delta y^{k,k-1}}{\Delta x^{k,k-1}} \quad (2.43)$$

Dimana,

SL : *Slope*, kemiringan garis

k : Titik kurva

x,y : Variabel fungsi x dan y

Sedangkan teknik prediksi pada titik (X^{k+1}, y^{k+1}) ditunjukkan pada persamaan dibawah ini :

$$SL^{k,k+1} = \frac{y^{k+1,PR} - y^{k,CR}}{x^k - x^{k-1}} = \frac{y^{k+1,PR} - y^{k,CR}}{\Delta x^{k,k+1}} \quad (2.44)$$

$$y^{k+1,PR} = SL^{k,k+1}(\Delta x^{k,k+1}) + y^{k,CR} \quad (2.45)$$

Dimana,

PR *superscript* : Solusi *Predictor*

CR *superscript* : Solusi *Corrector*

Dari persamaan (2.43) dan (2.44) dapat dihitung tegangan sistem pada bus i dengan menggunakan persamaan dibawah ini :

$$V_i^{k+1,PR} = SL_{Vi}^{k+1}(\Delta \lambda^{k,k+1}) + V_i^{k,CR} \quad (2.46)$$

$$\delta_i^{k+1,PR} = SL_{Vi}^{k+1}(\Delta \lambda^{k,k+1}) + \delta_i^{k,CR} \quad (2.47)$$

Jika persamaan (2.45) dan (2.46) diturunkan kembali akan didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$V_p = -\frac{(\lambda_{k-1}) - (\lambda_k)}{(\lambda_{k-1}) - (\lambda_{k-2})} [((V_{k-1}) - (V_{k-2})) + (V_{k-1})] \quad (2.48)$$

$$\delta_p = -\frac{(\lambda_{k-1}) - (\lambda_k)}{(\lambda_{k-1}) - (\lambda_{k-2})} [(\delta_{k-1}) - (\delta_{k-2}) + (\delta_{k-1})] \quad (2.49)$$

Dimana :

V_p : Tegangan *Predictor*

δ_p : Sudut Tegangan *Predictor*

V_k : Tegangan *Corector*

δ_k : Sudut Tegangan *Corector*

λ_k : *Continuation Parameter Factor*

2.13.2 Corector Step

Tahap koreksi pada metode ini menggunakan solusi *backward-forward sweep*. Dimana *backward* digunakan untuk menghitung arus saluran dari beban hingga ke sumber, sedangkan *forward sweep*

digunakan untuk menghitung deviasi tegangan dari sumber hingga ke beban. Perhitungan rinci metode tersebut telah dijelaskan pada sub bab analisis aliran daya.

2.13.3 Proses Solusi CPF

Metode CPF akan mempertimbangkan kenaikan beban yang akan diekspresikan menggunakan persamaan berikut ini :

$$P_{(nk,i)} = (1 + \lambda \cdot K)P_{(nk,0)} \quad (2.50)$$

Dimana,

$P_{(nk,i)}$: Pembebanan bus pada saat iterasi ke nk

$P_{(nk,0)}$: Pembebanan bus dengan nilai beban dasar

λ : *Continuation parameter factor*

K : *Load multiplier* pada bus ke i

Continuation paramater factor digunakan sebagai *step size control* untuk mengatur besarnya penambahan beban dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$\sigma_{k+1} = \sigma_k \frac{c}{n_k} \quad (2.51)$$

$$\lambda_{k+1} = \sigma_k + \lambda_k \quad (2.52)$$

Dimana :

C : Parameter ukuran kontrol

n_k : Banyaknya jumlah iterasi aliran daya saat k

k : Nilai iterasi pada *Continuation Power Flow*

Proses antara *predictor* dan *corector* akan berhenti hingga persamaan dibawah ini terpenuhi, yaitu :

$$\sigma_k < \varepsilon_{MLP} \quad (2.53)$$

Dimana σ_k adalah ukuran kontrol penambahan beban, sedangkan ε_{MLP} adalah definisi dari nilai toleransi untuk menentukan *Maximum Loading Point* (MLP).

BAB 3

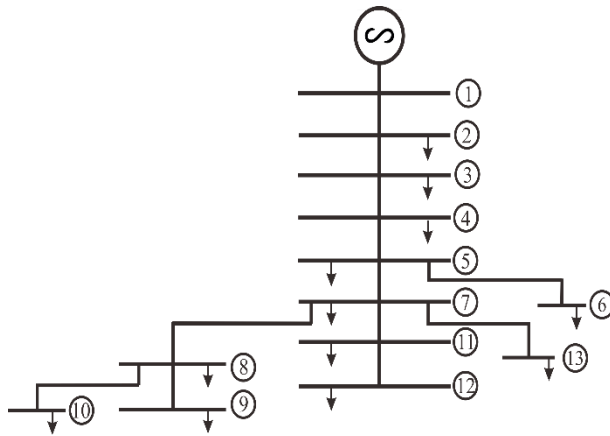
PERANCANGAN DAN PEMODELAN

3.1 Data Sistem Kelistrikan

Sistem kelistrikan yang digunakan dalam simulasi, pemodelan, analisa dan evaluasi stabilitas transien dan tegangan adalah sistem kelistrikan IEEE 13 dan 28 bus. Detail dari sistem kelistrikan tersebut dapat dilihat pada sub-bab 3.1.1 dan 3.1.2 di bawah ini.

3.1.1 Sistem Kelistrikan IEEE 13 Bus

Single line diagram dari kelistrikan IEEE 13 bus[17] dapat dilihat pada gambar 3.1 sedangkan spesifikasi data kabel dan beban dapat dilihat pada tabel 3.1 di bawah ini.



Gambar 3.1. Single line diagram IEEE 13 bus

Tabel 3.1 Data sistem kelistrikan IEEE 13 bus

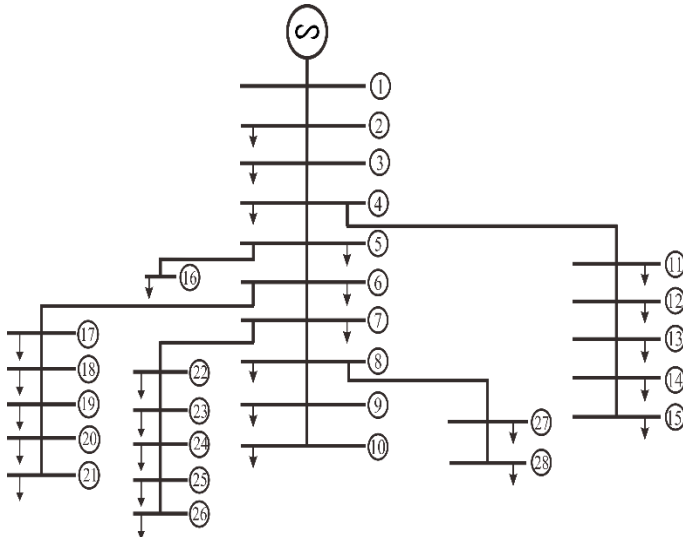
Nomor Cabang	Bus Kirim	Bus Terima	Resistansi	Reaktansi	Daya Beban pada Bus	
			R	X	P	Q
			(Ω)	(Ω)	kW	kVAR
2	1	2	0.176	0.138	890	468
3	2	3	0.176	0.138	628	470
4	3	4	0.045	0.035	1112	764

Tabel 3.1 Data sistem kelistrikan IEEE 13 bus (Lanjutan 1)

Nomor Cabang	Bus Kirim	Bus Terima	Resistansi	Reaktansi	Daya Beban pada Bus	
			R	X	P	Q
			(Ω)	(Ω)	kW	kVAR
5	4	5	0.089	0.069	636	378
6	5	6	0.045	0.035	474	344
7	5	7	0.116	0.091	1342	1078
8	7	8	0.073	0.073	920	292
9	8	9	0.074	0.058	766	498
10	8	10	0.093	0.093	662	480
11	7	11	0.063	0.050	690	186
12	11	12	0.068	0.053	1292	554
13	7	13	0.062	0.053	1124	480
TOTAL					10536	5992

3.1.2 Sistem Kelistrikan IEEE 28 Bus

Pada sistem kelistrikan IEEE 28 bus[18] ini, spesifikasi data kabel dan data bus yang terdiri dari resistansi, reaktansi, daya aktif dan reaktif beban telah disajikan pada tabel 3.2. Sedangkan *single line diagram* dapat dilihat ada gambar 3.2 di bawah ini.



Gambar 3.2. Single line diagram IEEE 28 bus

Tabel 3.2 Data sistem kelistrikan IEEE 28 bus

Nomor Cabang	Bus Kirim	Bus Terima	Resistansi	Reaktansi	Daya Beban pada Bus	
			R	X	P	Q
			(Ω)	(Ω)	kW	kVAR
2	1	2	1.197	0.852	35.28	35.99
3	2	3	1.796	1.231	14	35.99
4	3	4	1.306	0.895	35.28	35.99
5	4	5	1.851	1.268	14	35.99
6	5	6	1.524	1.268	35.28	35.99
7	6	7	1.905	1.305	35.28	35.99
8	7	8	1.917	0.820	35.28	35.99
9	8	9	0.653	0.447	14	14.28
10	9	10	1.143	0.447	14	14.28
11	4	11	2.823	1.172	56	57.13
12	11	12	1.840	0.491	35.28	35.99
13	12	13	1.002	0.416	35.28	35.99
14	13	14	0.455	0.189	14	14.28
15	14	15	0.546	0.227	35.28	35.99
16	5	16	2.550	1.058	35.28	35.99
17	6	17	1.366	0.567	8.96	9.14
18	17	18	0.819	0.340	8.96	9.14
19	18	19	1.548	0.642	35.28	35.99
20	19	20	1.366	0.567	35.28	35.99
21	20	21	3.552	1.474	14	14.28
22	7	22	1.548	0.642	35.28	35.99
23	22	23	1.092	0.453	8.96	9.14
24	23	24	0.910	0.378	56	57.13
25	24	25	0.455	0.189	8.96	9.14
26	25	26	0.364	0.157	35.28	35.99
27	8	27	0.546	0.226	35.28	35.99
28	27	28	0.273	0.113	35.28	35.99
TOTAL					761.04	819.77

3.1.3 Data Generator dan DG

Berikut ini adalah spesifikasi dari generator utama beserta DG yang akan digunakan dalam simulasi stabilitas transien dan tegangan.

Tabel 3.3 Spesifikasi Generator Utama

Generator Utama	
Tipe / Jenis	Generator Sinkron
Letak Bus	Bus 1
Mode Operasi	Swing / Slack
Konstanta Inersia	50 pu
Reaktansi Transien	0.324 ohm

Tabel 3.4 Spesifikasi DG

<i>Distributed Generation</i>		
Jenis / Tipe	Diesel	<i>Photovoltaic</i>
Konstanta Inersia	9 pu	-
Reaktansi Transien	0.232 ohm	-
Faktor Daya	0.85	1

Dalam simulasi ini, DG yang digunakan hanya DG berjenis diesel dan photovoltaic. DG diesel memiliki momen inersia dan reaktansi transien yang berpengaruh pada kecepatan putar maupun sudut rotornya. DG jenis diesel akan mensuplai daya aktif dan reaktif pada sistem. Besar daya aktif bergantung pada level yang dibangkitkan, sedangkan daya reaktif tergantung dari faktor daya yang digunakan. Oleh karenanya, DG berjenis photovoltaic akan mensuplai daya aktif saja ke dalam sistem.

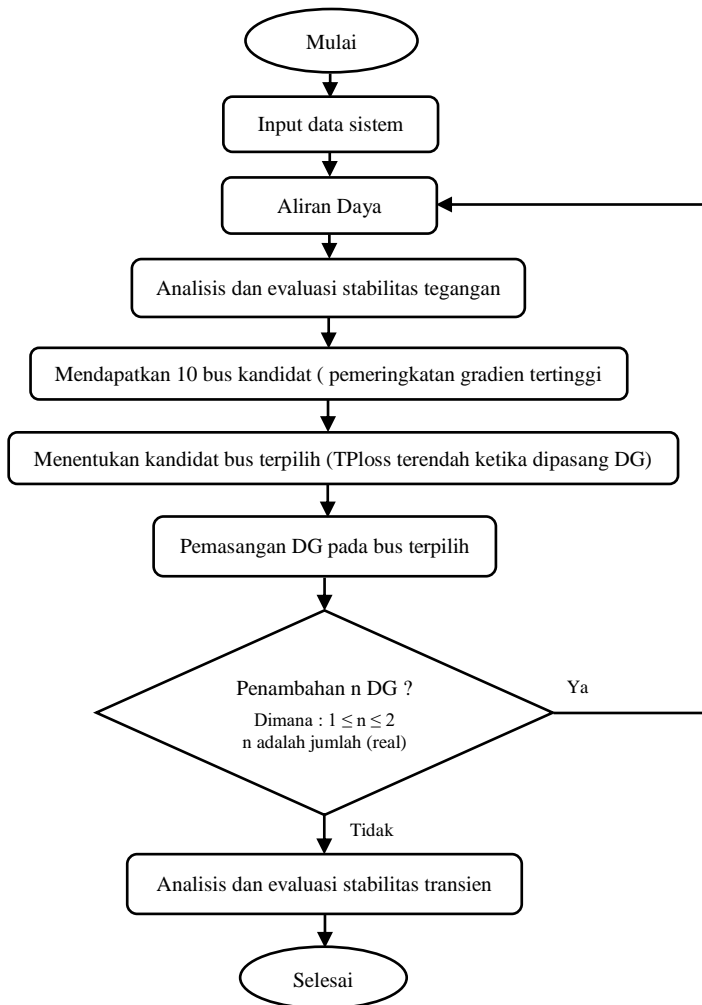
Tabel 3.5 Skenario level pembangkitan DG

Sistem Kelistrikan	Jumlah DG	Total Pembangkitan Daya Aktif DG
IEEE 13 Bus	1 unit	45 %
	2 unit	38 %
IEEE 28 Bus	1 unit	50 %
	2 unit	45 %

Level pembangkitan daya aktif DG ditentukan dengan rumus berikut :

$$\% \text{ Level } P = \frac{P_{DG}}{P_{DG} + P_{CG}} \times 100 \% \quad (3.1)$$

3.2 Mekanisme Simulasi, Analisis dan Evaluasi Sistem



Gambar 3.3 Diagram alir simulasi, analisis dan evaluasi sistem

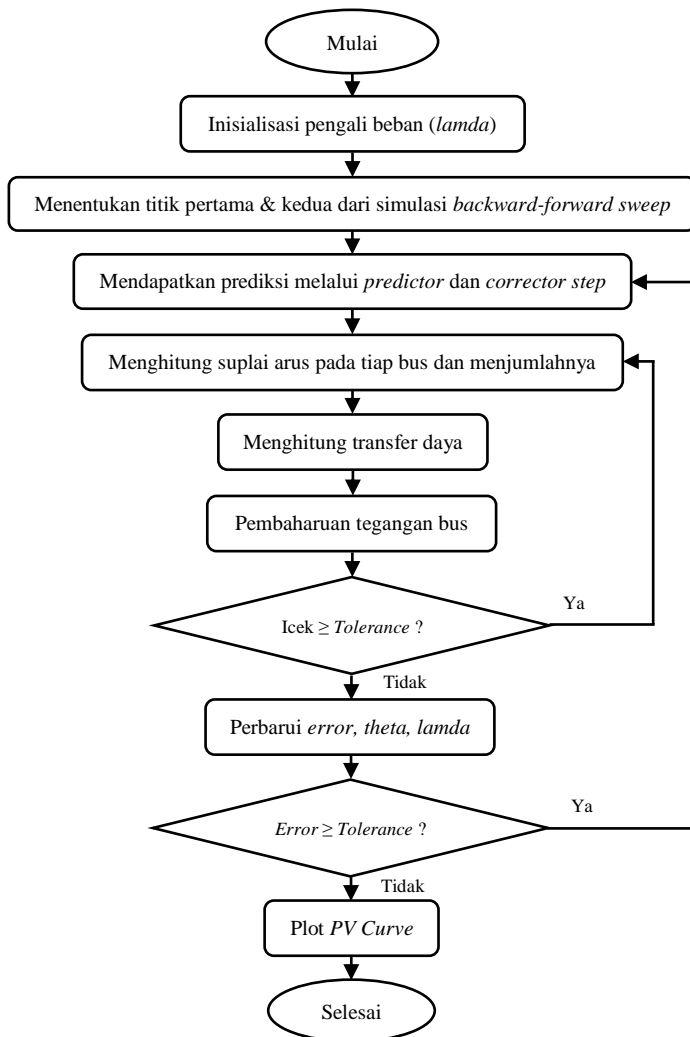
Pada diagram alir di atas menunjukkan bagaimana proses simulasi, analisis dan evaluasi dari sistem yang akan di uji. Penjelasan mekanisme dari diagram alir di atas telah diuraikan di bawah ini :

1. Pertama, memasukkan data sistem yang akan diuji, meliputi data saluran, data beban, data generator utama.
2. Selanjutnya akan diproses menggunakan program *backward-forward sweep* sebagai analisis aliran daya dari sistem yang uji.
3. Kemudian melakukan analisis dan evaluasi pada stabilitas tegangan. Mekanisme detailnya akan dijelaskan pada sub-bab selanjutnya.
4. Melakukan perhitungan nilai gradien dari setiap bus, kemudian dilakukan pemeringkatan dari nilai tersebut dan diambil 10 gradien teratas untuk dijadikan sebagai kandidat bus dalam pemasangan DG. Perhitungan gradien dilakukan dengan rumus sebagai berikut :

$$M = \frac{\Delta Y}{\Delta X} = \frac{\Delta V}{\Delta P} = \frac{V_{maks}-V_{min}}{P_{maks}-P_{min}} \quad (3.2)$$

5. Melakukan pemasangan DG pada setiap bus kandidat tersebut dengan level pembangkitan daya aktif DG yang telah ditentukan. Kemudian dengan menggunakan metode analitis akan didapatkan besar rugi daya aktif sistem terkecil di antara 10 bus kandidat tersebut.
6. Dengan demikian, pemasangan DG dilakukan pada bus yang memiliki rugi daya aktif terkecil tersebut dengan level pembangkitan yang telah ditentukan sebelumnya.
7. Dalam penambahan jumlah DG perlu memperhatikan syarat yang telah dibuat, yaitu jumlah minimal DG sebanyak 1 unit dan maksimalnya 2 unit.
8. Tahap terakhir adalah melakukan analisis dan evaluasi pada stabilitas transien yang akan dijelaskan mekanismenya pada sub-bab berikutnya.

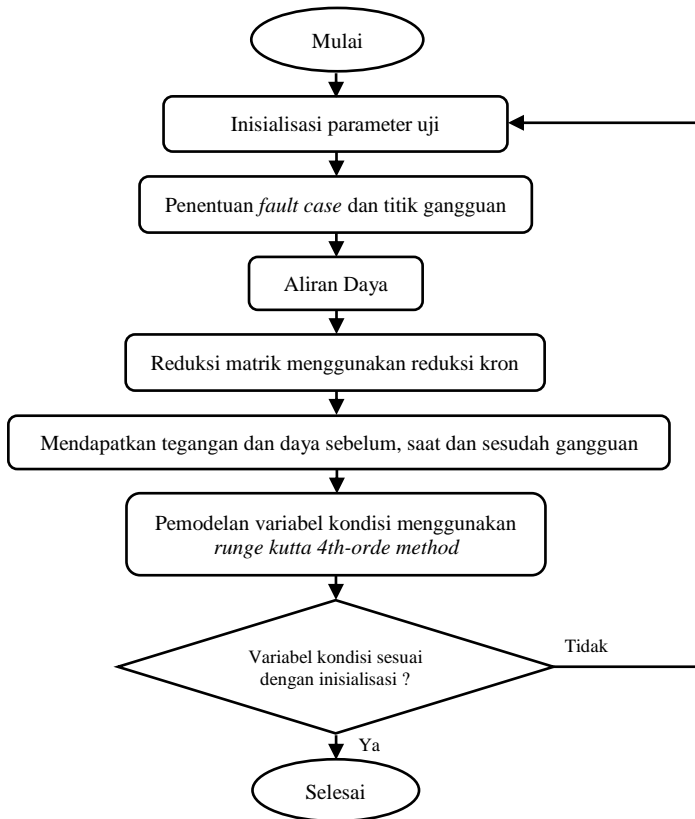
3.3 Simulasi, Analisis dan Evaluasi Stabilitas Tegangan



Gambar 3.4 Diagram alir analisis dan evaluasi stabilitas tegangan

Pada tahap ini metode yang digunakan ialah *continuation power flow*. Metode continuation power flow digunakan untuk menentukan bus sensitif dengan melakukan penambahan beban pada bus yang diuji. Bus tersensitif dapat dilihat dari besar kecuraman kurva P-V, semakin curam maka semakin sensitif terhadap penambahan beban. Metode ini cukup akurat karena dianalisis menggunakan *backward-forward sweep*, *predictor step* dan *corrector step*.

3.4 Simulasi, Analisis dan Evaluasi Stabilitas Transien



Gambar 3.5 Diagram alir analisis dan evaluasi stabilitas transien

Dalam analisis dan evaluasi stabilitas transien, metode yang digunakan adalah metode simulasi numerik berbasis lintasan kritis. Metode ini adalah pengembangan dari metode time domain simulation, namun *state variable* yang dihasilkan sangat mudah dalam menentukan stabil atau tidaknya sistem tersebut saat terjadi gangguan. Metode ini terdiri beberapa tahap yaitu :

1. Inisialisasi parameter yang meliputi jumlah generator, besar inersia, reaktansi transien, CCT stabil dan tidak stabil, dan level akurasi.
2. Penentuan terjadinya titik gangguan, yaitu terjadinya gangguan diantara bus berapa dan berapa.
3. Selanjutnya melakukan analisis aliran daya menggunakan metode *backward forward sweep*.
4. Reduksi kron digunakan untuk menyederhanakan matrik, yang bertujuan untuk mempermudah perhitungan dalam analisis stabilitas transien pada sistem *multimachine*.
5. Melalui formula pemodelan sistem dalam analisis stabilitas transien, maka akan didapatkan nilai daya dan tegangan sebelum, saat dan sesudah gangguan.
6. Kemudian hasil dari tahap sebelum-sebelumnya akan dimodelkan dalam bentuk variabel kondisi menggunakan metode runge-kutta orde 4. Dengan pemodelan variabel kondisi dapat diketahui stabilitas dari sistem tersebut berdasarkan waktu pemutus kritis yang telah ditentukan sebelumnya.

Khusus untuk analisa stabilitas transien, sistem yang digunakan harus memenuhi kondisi berikut ini :

- a. Sistem setidaknya terhubung dengan 2 generator sinkron.
- b. Sistem tidak terhubung dengan *infinite bus*.
- c. Selama simulasi suplai daya dianggap tetap.
- d. Mengabaikan pengaruh governor dan daya asinkron (*damping*).
- e. Menggunakan simulasi *Center of Inertia* (COI).

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4

HASIL SIMULASI DAN ANALISA

4.1 Sistem Kelistrikan IEEE 13 Bus

Pada sub bab ini membahas tentang hasil simulasi stabilitas transien dan tegangan pada sistem kelistrikan IEEE 13 bus.

4.1.1 Hasil Simulasi Stabilitas Tegangan

Pada hasil simulasi stabilitas tegangan ini akan terbagi menjadi 3 bagian, yaitu ketika belum terhubung dengan *distributed generation* (DG), ketika terhubung dengan 1 unit DG (diesel) dan ketika terhubung dengan 2 unit DG (diesel dan photovoltaic).

4.1.1.1 Tanpa Terhubung DG

Berikut ini adalah hasil simulasi stabilitas tegangan menggunakan metode *continuation power flow* (CPF) tanpa terhubung dengan DG. Tujuan utama dari simulasi ini untuk mendapatkan bus tersensitif terhadap *voltage drop* saat dilakukan penambahan beban secara terus-menerus (*continue*). Hasil simulasi tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.1 dibawah ini.

Tabel 4.1 Hasil simulasi CPF tanpa DG

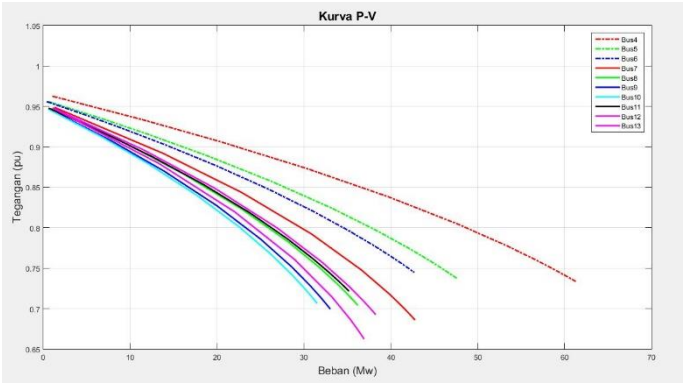
No Bus	Kondisi Awal			Kondisi Akhir		
	Tegangan	Lamda	Beban	Tegangan	Lamda	Beban
	(p.u)	(Kali)	(MW)	(p.u)	(Kali)	(MW)
1	1.0000	0.5	0.0000	1.0000	0.0000	136.9822
2	0.9824	0.5	0.8900	0.7713	25.4854	136.9822
3	0.9663	0.5	0.6280	0.7582	17.1250	65.1549
4	0.9625	0.5	1.1120	0.7341	9.0085	61.2168
5	0.9559	0.5	0.6360	0.7381	12.2845	47.5135
6	0.9557	0.5	0.4740	0.7454	14.8234	42.6317
7	0.9486	0.5	1.3420	0.6866	5.1397	42.7271
8	0.9468	0.5	0.9200	0.7047	6.3829	36.1534
9	0.9463	0.5	0.7660	0.7002	7.0095	32.9815
10	0.9461	0.5	0.6620	0.7072	7.7538	31.4600
11	0.9475	0.5	0.6900	0.7221	8.3209	35.1385
12	0.9467	0.5	1.2920	0.6631	4.5904	36.8771
13	0.9479	0.5	1.1240	0.6934	5.4972	38.1968

Setelah dilakukan simulasi CPF diatas, maka selanjutnya adalah mengurutkan bus mulai dari yang bersensitivitas tinggi hingga rendah dengan cara menghitung gradien kurva P-V pada setiap bus. Hasil perhitungan gradien kurva P-V dapat dilihat pada tabel 4.2

Tabel 4.2 Hasil perhitungan gradien tanpa DG

Peringkat	Nomor Bus	ΔV	ΔP	Gradien
		($V_{awal} - V_{akhir}$)	($P_{akhir} - P_{awal}$)	($\Delta V/\Delta P$)
1	12	0.2836	35.5851	0.00797
2	10	0.2389	30.7980	0.00776
3	9	0.2461	32.2155	0.00764
4	8	0.2421	35.2334	0.00687
5	13	0.2545	37.0728	0.00687
6	11	0.2254	34.4485	0.00654
7	7	0.2619	41.3851	0.00633
8	6	0.2103	42.1577	0.00499
9	5	0.2178	46.8775	0.00465
10	4	0.2284	60.1048	0.00380
11	3	0.2081	64.5269	0.00322
12	2	0.2111	136.0922	0.00155
13	1	0.0000	0.0000	0.00000

Dari tabel 4.2 tersebut didapatkan peringkat teratas 10 bus yang memiliki tingkat sensitivitas tertinggi yaitu bus 12, 10, 9, 8, 13, 11, 7, 6, 5 dan 4. 10 bus tersebut merupakan kandidat yang akan dijadikan sebagai pertimbangan lokasi pemasangan DG pertama (diesel).



Gambar 4.1 Kurva P-V IEEE 13 Bus Tanpa DG

4.1.1.2 Terhubung dengan 1 DG

Penentuan lokasi DG pertama dilakukan dengan menggunakan metode analitik, sehingga dari 10 bus kandidat tersebut akan didapatkan bus yang memiliki rugi daya aktif terkecil ketika dipasang DG (diesel). Suplai daya aktif dari DG pertama ini sebesar 45% dan 38% dari total daya aktif beban dengan faktor daya sebesar 0.85. Secara matematis, daya aktif dan reaktif DG dengan pembangkitan sebesar 45% adalah 4.7412 MW dan 2.4976 MVAR, sedangkan dengan pembangkitan 38% sebesar 4.0037 MW dan 2.1091 MVAR. Hasil urutan bus yang memiliki rugi daya terkecil ketika dipasang DG pertama dapat dilihat pada tabel 4.3 di bawah ini.

Tabel 4.3 Hasil penentuan lokasi DG pertama IEEE 13 bus

HASIL SIMULASI PENENTUAN LOKASI DG				
Bus Kandidat	Suplay DG 45 %		Suplay DG 38 %	
	Rugi Daya setiap Bus bila Terhubung dengan DG 1 (Diesel) (kW)	Peringkat (dari yang terkecil)	Rugi Daya setiap Bus bila Terhubung dengan DG 1 (Diesel) (kW)	Peringkat (dari yang terkecil)
12	178.7501	9	224.9371	10
10	180.3286	10	225.0338	8
9	176.7808	7	222.4327	7
8	166.7421	1	215.7005	1
13	176.9697	8	225.3304	9
11	171.9159	3	220.8041	6
7	167.4338	2	218.3817	3
6	173.2072	5	218.5866	4
5	172.7663	4	218.2413	2
4	175.2515	6	220.8018	5

Dari tabel 4.3 dapat diketahui bahwa dengan memasang DG pada bus 8 dengan suplai sebesar 45% dan 38%, akan didapatkan rugi daya aktif pada sistem yang sangat kecil jika dibandingkan dengan memasang DG pada bus yang lain. Oleh karenanya, pemasangan DG pertama diletakkan pada bus 8.

Setelah mendapatkan lokasi penempatan DG pertama, maka prosedur selanjutnya adalah menjalankan program CPF pada sistem kelistrikan yang telah terhubung dengan 1 unit DG (diesel) dengan persentase pembangkitan daya aktif yang berbeda. Hasil simulasi tersebut telah disajikan pada tabel 4.4 di bawah ini.

Tabel 4.4 Hasil simulasi CPF terhubung 1 unit DG

No Bus	Suplay DG 45 %				Suplay DG 38 %			
	Kondisi Awal		Kondisi Akhir		Kondisi Awal		Kondisi Akhir	
	V_1	$Load_1$	V_2	$Load_2$	V_1	$Load_1$	V_2	$Load_2$
	(p.u)	(MW)	(p.u)	(MW)	(p.u)	(MW)	(p.u)	(MW)
1	1.0000	0.000	1.0000	153.028	1.0000	0.000	1.0000	153.148
2	0.9904	0.890	0.7482	153.028	0.9892	0.890	0.7452	153.148
3	0.9822	0.628	0.7316	76.605	0.9798	0.628	0.7428	73.602
4	0.9804	1.112	0.7044	71.892	0.9777	1.112	0.7220	68.431
5	0.9778	0.636	0.7095	57.281	0.9745	0.636	0.7260	54.338
6	0.9776	0.474	0.7164	51.648	0.9743	0.474	0.7231	50.048
7	0.9757	1.342	0.6514	51.262	0.9716	1.342	0.6702	49.070
8	0.9774	0.920	0.6625	45.205	0.9727	0.920	0.6827	42.943
9	0.9768	0.766	0.6655	40.485	0.9722	0.766	0.6850	38.487
10	0.9767	0.662	0.6817	38.259	0.9721	0.662	0.6901	36.948
11	0.9746	0.690	0.6923	42.980	0.9705	0.690	0.7046	41.190
12	0.9739	1.292	0.6190	43.562	0.9698	1.292	0.6406	41.935
13	0.9751	1.124	0.6607	45.739	0.9710	1.124	0.6692	44.400

Setelah dilakukan simulasi CPF diatas, maka selanjutnya adalah mengurutkan bus mulai dari yang bersensitivitas tinggi hingga rendah, dengan cara menghitung gradien kurva P-V pada setiap bus. Hasil perhitungan gradien kurva P-V yang telah terhubung dengan 1 unit DG dengan besar pembangkitan daya aktif yang berbeda dapat dilihat pada tabel 4.5

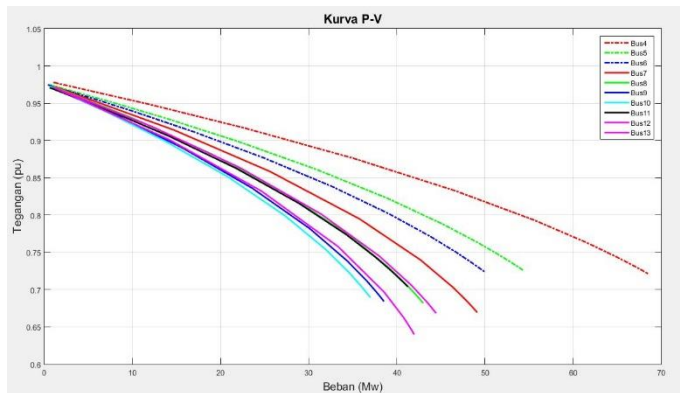
Tabel 4.5 Hasil perhitungan gradien terhubung dengan 1 unit DG

Rank	Suplay DG 45 %				Suplay DG 38 %			
	No Bus	ΔV	ΔL	Gradien	No Bus	ΔV	ΔL	Gradien
		V_1-V_2	L_2-L_1	$(\Delta V/\Delta L)$		V_1-V_2	L_2-L_1	$(\Delta V/\Delta L)$
1	12	0.3549	42.270	0.00839	12	0.3291	40.643	0.00809
2	10	0.2950	37.597	0.00785	10	0.2819	36.286	0.00777
3	9	0.3113	39.719	0.00784	9	0.2871	37.721	0.00761
4	8	0.3149	44.285	0.00711	8	0.2901	42.023	0.00697
5	13	0.3144	44.616	0.00705	13	0.3018	43.276	0.00690
6	11	0.2823	42.290	0.00668	11	0.2660	40.499	0.00657
7	7	0.3243	49.920	0.00650	7	0.3014	47.727	0.00632
8	6	0.2612	51.174	0.00511	6	0.2512	49.574	0.00507
9	5	0.2684	56.645	0.00474	5	0.2485	53.702	0.00463
10	4	0.2760	70.780	0.00390	4	0.2558	67.319	0.00380
11	3	0.2506	75.977	0.00330	3	0.2371	72.974	0.00325

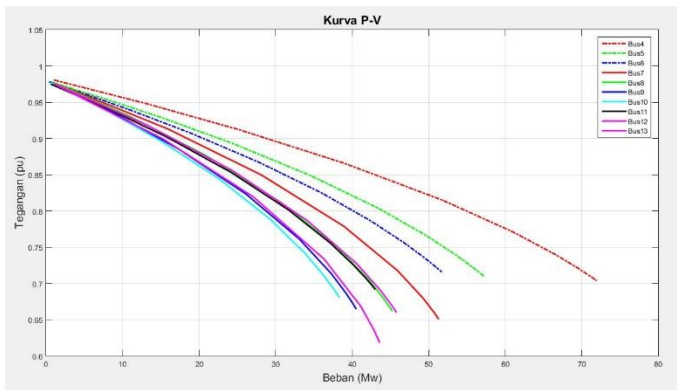
Tabel 4.5 Hasil perhitungan gradien terhubung dengan 1 unit DG
(Lanjutan 1)

Rank	Suplay DG 45 %				Suplay DG 50 %			
	No Bus	ΔV	ΔL	Gradien	No Bus	ΔV	ΔL	Gradien
		$V_1 - V_2$	$L_2 - L_1$	$(\Delta V / \Delta L)$		$V_1 - V_2$	$L_2 - L_1$	$(\Delta V / \Delta L)$
12	2	0.2422	152.138	0.00159	2	0.2440	152.258	0.00160
13	1	0.0000	0.000	0.00000	1	0.0000	0.000	0.00000

Dari tabel 4.5 didapatkan peringkat teratas 10 bus yang memiliki tingkat sensitivitas tertinggi yaitu bus 12, 10, 9, 8, 13, 11, 7, 6, 5 dan 4. 10 bus tersebut merupakan kandidat yang akan dijadikan sebagai pertimbangan lokasi pemasangan DG kedua (*photovoltaic*). Gambar 4.2 dan 4.3 menunjukkan kurva PV saat sistem terhubung dengan DG 1 unit dengan level pembangkitan yang berbeda.



Gambar 4.2 Kurva P-V IEEE 13 Bus 1 Unit DG 38%



Gambar 4.3 Kurva P-V IEEE 13 Bus 1 Unit DG 45%

4.1.1.3 Terhubung dengan 2 DG

Lokasi peletakan DG kedua dilakukan dengan menggunakan metode analitik. Dengan cara yang sama, dari 10 bus kandidat tersebut akan didapatkan bus yang memiliki rugi daya aktif terkecil ketika dipasang DG kedua ini. Dengan mempertimbangkan pembangkitan total daya aktif semua DG sebesar 45% dan 38 % dari jumlah daya aktif beban, maka suplai daya aktif dari DG pertama dan DG kedua ini sebesar 22.5% dan 19% dari total daya aktif beban. Dengan besar faktor daya sebesar 0.85, maka secara matematis, besar pembangkitan daya aktif dan reaktif DG pertama saat pembangkitan 22,5% sebesar 2.3706 MW dan 1.2488 MVAR, sedangkan DG kedua sebesar 2.3706 MW. Saat besar pembangkitan 19%, maka besar pembangkitan DG pertama sebesar 2.00185 MW dan 1.05455 MVAR, sedangkan DG kedua sebesar 2.00185 MW. Hasil urutan bus yang memiliki rugi daya terkecil ketika dipasang DG kedua dapat dilihat pada tabel 4.6 di bawah ini.

Tabel 4.6 Hasil penentuan lokasi DG kedua IEEE 13 bus

HASIL SIMULASI PENENTUAN LOKASI DG				
Bus Kandidat	Suplay DG 45 %		Suplay DG 38 %	
	Rugi Daya setiap Bus bila Terhubung dengan DG 2 (PV) (kW)	Peringkat (dari yang terkecil)	Rugi Daya setiap Bus bila Terhubung dengan DG 2 (PV) (kW)	Peringkat (dari yang terkecil)
12	163.9034	6	214.2709	5
10	169.1960	9	217.2824	8
9	168.2289	8	216.5321	7

Tabel 4.6 Hasil penentuan lokasi DG kedua IEEE 13 bus (Lanjutan 1)

HASIL SIMULASI PENENTUAN LOKASI DG				
Bus Kandidat	Suplay DG 45 %		Suplay DG 38 %	
	Rugi Daya setiap Bus bila Terhubung dengan DG 2 (PV) (kW)	Peringkat (dari yang terkecil)	Rugi Daya setiap Bus bila Terhubung dengan DG 2 (PV) (kW)	Peringkat (dari yang terkecil)
8	355.3088	10	393.0163	10
13	166.7611	7	217.2868	9
11	163.6879	4	214.4881	4
7	163.7406	5	214.7008	6
6	162.0148	2	209.1064	2
5	161.9355	1	209.0501	1
4	162.8923	3	210.0954	3

Dari tabel 4.6 dapat diketahui bahwa dengan memasang DG kedua pada bus 5 rugi daya aktif pada sistem akan semakin kecil jika dibandingkan dengan memasang DG pada bus yang lain. Oleh karenanya, pemasangan DG kedua diletakkan pada bus 5. Prosedur selanjutnya adalah menjalankan program CPF pada sistem kelistrikan yang telah terhubung dengan 2 unit DG (bus 8 dan bus 5). Hasil simulasi tersebut telah disajikan pada tabel 4.7 di bawah ini.

Tabel 4.7 Hasil simulasi CPF terhubung 2 unit DG

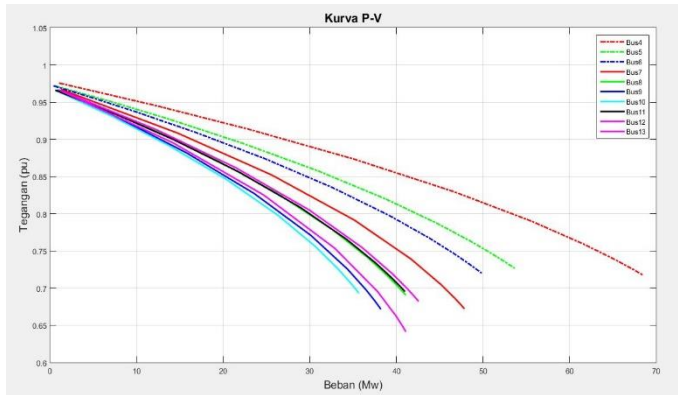
No Bus	Suplay DG 45 %				Suplay DG 38 %			
	Kondisi Awal		Kondisi Akhir		Kondisi Awal		Kondisi Akhir	
	V_1	$Load_1$	V_2	$Load_2$	V_1	$Load_1$	V_2	$Load_2$
	(p.u)	(MW)	(p.u)	(MW)	(p.u)	(MW)	(p.u)	(MW)
1	1.0000	0.000	1.0000	153,028	1.0000	0.000	1.0000	152,387
2	0.9904	0.890	0.7481	153,028	0.9892	0.890	0.7472	152,387
3	0.9822	0.628	0.7391	75,219	0.9797	0.628	0.7426	73,602
4	0.9804	1.112	0.7093	71,189	0.9777	1.112	0.7217	68,431
5	0.9778	0.636	0.7092	57,281	0.9744	0.636	0.7258	54,338
6	0.9776	0.474	0.7161	51,648	0.9742	0.474	0.7231	50,020
7	0.9731	1.342	0.6510	50,527	0.9694	1.342	0.6756	48,034
8	0.9731	0.920	0.6760	43,263	0.9691	0.920	0.6890	41,584
9	0.9726	0.766	0.6728	39,147	0.9686	0.766	0.6770	38,227
10	0.9724	0.662	0.6865	37,089	0.9684	0.662	0.6984	35,659
11	0.9721	0.690	0.7033	41,480	0.9683	0.690	0.7009	40,952
12	0.9713	1.292	0.6327	42,441	0.9676	1.292	0.6386	41,563
13	0.9725	1.124	0.6720	44,373	0.9688	1.124	0.6665	44,032

Setelah dilakukan simulasi CPF diatas, selanjutnya adalah menghitung gradien kurva P-V pada setiap bus untuk digunakan analisa stabilitas tegangan ketika dilakukan penambahan beban secara terus-menerus (*continue*). Hasil perhitungan gradien kurva P-V saat terhubung dengan 2 unit DG dapat dilihat pada tabel 4.8

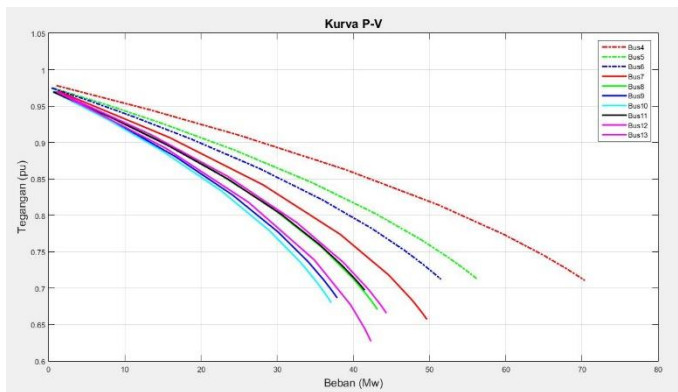
Tabel 4.8 Hasil perhitungan gradien saat terhubung 2 unit DG

Rank	Suplay DG 45 %				Suplay DG 38 %			
	No Bus	ΔV	ΔL	Gradien	No Bus	ΔV	ΔL	Gradien
		V_1-V_2	L_2-L_1	$(\Delta V/\Delta L)$		V_1-V_2	L_2-L_1	$(\Delta V/\Delta L)$
1	12	0,3548	41,1494	0,00823	12	0,3290	40,271	0,00817
2	10	0,2950	36,4266	0,00785	9	0,2916	37,461	0,00778
3	9	0,3113	38,3809	0,00781	10	0,2700	34,997	0,00772
4	8	0,3149	42,3429	0,00702	13	0,3023	42,908	0,00705
5	13	0,3143	43,2488	0,00695	8	0,2801	40,664	0,00689
6	11	0,2823	40,7900	0,00659	11	0,2674	40,262	0,00664
7	7	0,3242	49,1850	0,00655	7	0,2938	46,692	0,00629
8	6	0,2612	51,1743	0,00511	6	0,2511	49,546	0,00507
9	5	0,2683	56,6448	0,00474	5	0,2487	53,702	0,00463
10	4	0,2760	70,0771	0,00387	4	0,2559	67,319	0,00380
11	3	0,2506	74,5910	0,00326	3	0,2372	72,974	0,00325
12	2	0,2422	152,138	0,00159	2	0,2420	151,497	0,00159
13	1	0,0000	0,0000	0,00000	1	0,0000	0,000	0,00000

Untuk merepresntasikan nilai gradien tersebut perlu diilustrasikan dalam bentuk kurva P-V yang telah disajikan seperti gambar 4.4 dan 4.5.



Gambar 4.4 Kurva P-V IEEE 13 Bus 2 Unit DG 38%



Gambar 4.5 Kurva P-V IEEE 13 Bus 2 Unit DG 45%

Dengan penambahan DG yang lokasinya ditentukan melalui metode matematis, didapatkan kenaikan nilai indeks tegangan sistem dan rugi daya sistem dapat berkurang secara signifikan. Pengaruh penambahan dan penempatan DG dapat dilihat pada tabel 4.9.

Tabel 4.9 Pengaruh DG terhadap indek tegangan dan rugi daya

Tanpa DG	Indeks Tegangan Sebelum Terhubung DG	0.026326	
	Rugi Daya Sistem Sebelum Terhubung DG	Daya Aktif	466040.1022 Watt
		Daya Reaktif	365721.6867 VAR
Suplai DG 45 %	Indeks Tegangan Terhubung 1 unit DG (Bus 8)	0.005915	
	Rugi Daya Sistem Terhubung 1 unit DG (Bus 8)	Daya Aktif	117670.3311 Watt
		Daya Reaktif	93039.1729 VAR
Suplai DG 38 %	Indeks Tegangan Terhubung 1 unit DG (Bus 8)	0.008059	
	Rugi Daya Sistem Terhubung 1 unit DG (Bus 8)	Daya Aktif	152512.7317 Watt
		Daya Reaktif	119922.3050 VAR
Suplai DG 45 %	Indeks Tegangan Terhubung 2 unit DG (Bus 8 dan 5)	0.007104	
	Rugi Daya Sistem Terhubung 2 unit DG (Bus 8 dan 5)	Daya Aktif	129775.0420 Watt
		Daya Reaktif	101792.4230 VAR
Suplai DG 38 %	Indeks Tegangan Terhubung 2 unit DG (Bus 8 dan 5)	0.009243	
	Rugi Daya Sistem Terhubung 2 unit DG (Bus 8 dan 5)	Daya Aktif	166638.2738 Watt
		Daya Reaktif	130663.4857 VAR

4.1.2 Hasil Simulasi Stabilitas Transien

Pada simulasi stabilitas transien, hasil yang diperhatikan adalah waktu pemutus kritis (CCT), respon sudut rotor dan trajektori dari generator. Hasil tersebut dapat berbeda-beda, hal tersebut tergantung dari jumlah, kombinasi jenis dan prosentase pembangkitan daya aktif DG yang terkoneksi dengan sistem kelistrikan.

Pada sub bab ini terbagi menjadi 2 bagian hasil simulasi, yaitu ketika terhubung 1 unit DG dan 2 unit DG.

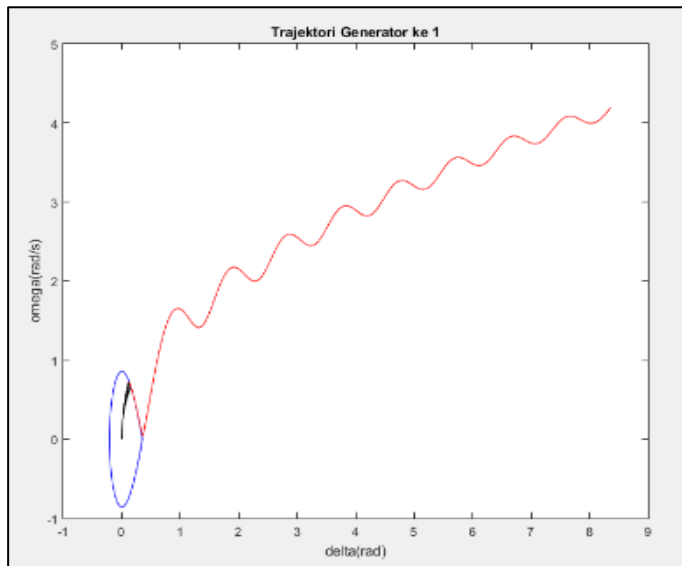
4.1.2.1 Terhubung dengan 1 DG

Pada skenario simulasi ini dilakukan dengan menghubungkan 1 unit DG pada sistem kelistrikan IEEE 13 bus di bus 8 yang letaknya telah dioptimasi pada sub bab sebelumnya. Besar prosentase suplai daya aktif dari DG dibagi menjadi dua, yaitu sebesar 45% dan 38% dengan faktor daya DG pertama sebesar 0.85 dan DG kedua sebesar 1.

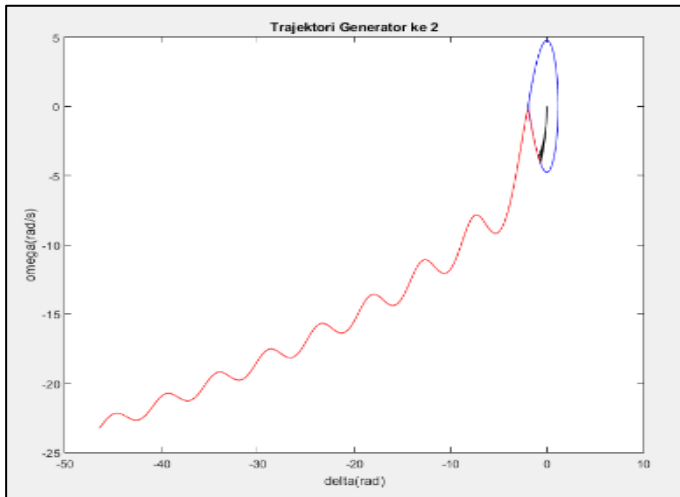
Hasil simulasi waktu pemutus kritis yang didapatkan dari program metode simulasi numerik berbasis *critical trajectory* dapat dilihat pada tabel 4.10.

Tabel 4.10 Hasil CCT terhubung 1 unit DG

Prosentase Suplai DG		45%		38%	
No	Kasus Gangguan	TC Stabil	TC tidak stabil	TC stabil	TC tidak stabil
1	6 – 5	0.313	0.314	0.313	0.314
2	9 – 8	0.401	0.402	0.401	0.402
3	10 – 8	0.438	0.439	0.438	0.439
4	11 – 7	0.333	0.334	0.333	0.334
5	12 – 11	0.348	0.349	0.349	0.350
6	13 – 7	0.341	0.342	0.341	0.342

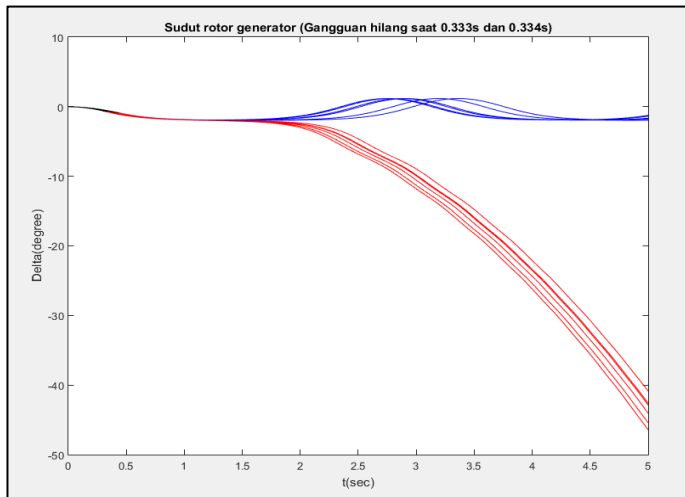


Gambar 4.6 Trajektori generator pusat pembangkitan 38% 1 DG

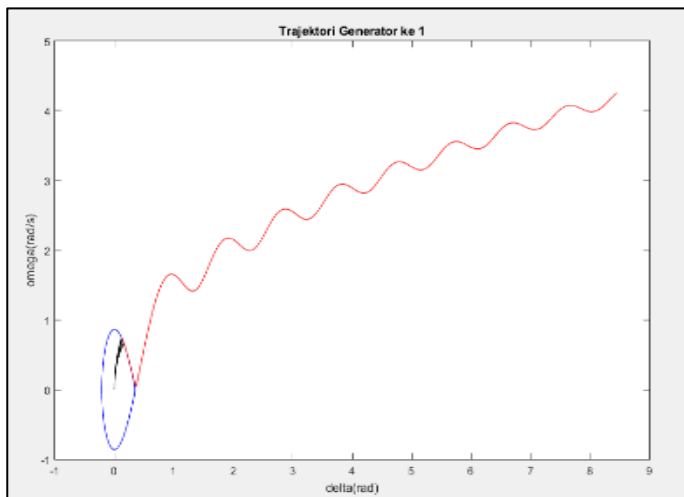


Gambar 4.7 Trajektori generator DG pembangkitan 38% 1 DG

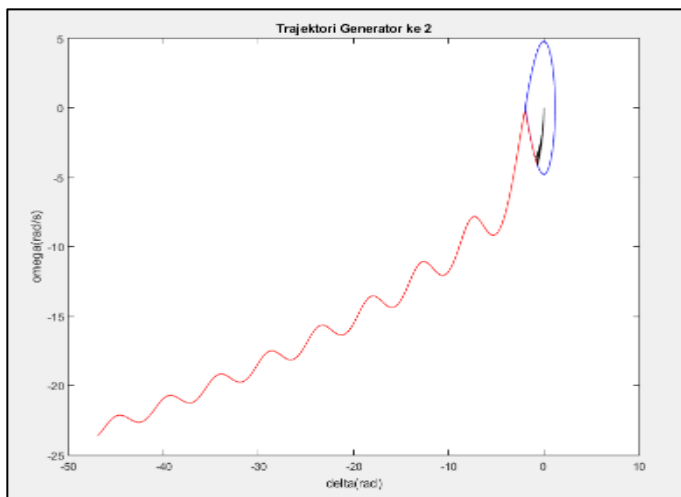
Gambar 4.6 dan 4.7 menunjukkan trajektori generator pertama dan kedua saat besar pembangkitan daya aktif 38%. Waktu pembersihan gangguan telah tertera pada tabel 4.10. Warna merah menunjukkan bahwa generator telah lepas sinkronisasi ketika waktu pembersihan terlambat 0.001 detik dari waktu pemutus kritisnya. Sedangkan untuk respon sudut rotor generator dapat dilihat pada gambar 4.8, dimana warna biru menunjukkan sudut rotor masih mampu mempertahankan stabilitasnya, sedangkan warna merah menunjukkan ketidakstabilan sudut rotor.



Gambar 4.8 Respon sudut rotor pembangkitan 38% 1 DG

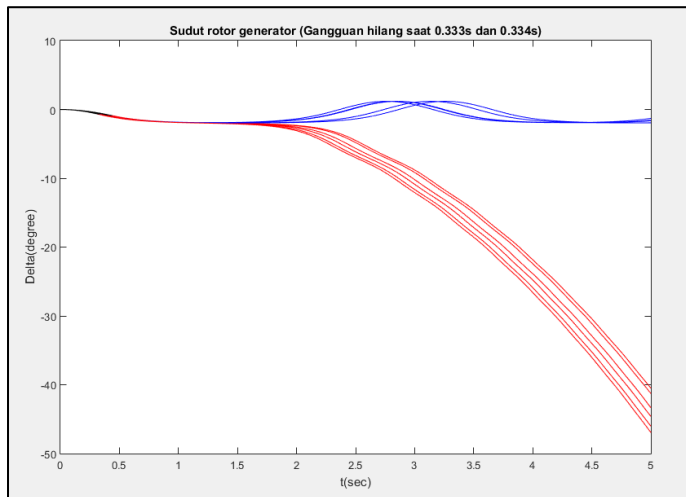


Gambar 4.9 Trajektori generator pusat pembangkitan 45% 1 DG



Gambar 4.10 Trajektori generator DG pembangkitan 45% 1 DG

Gambar 4.9 dan 4.10 menunjukkan trajektori dari generator pertama dan kedua saat pembangkitan daya aktif sebesar 45%. Sedangkan gambar 4.11 menunjukkan respon sudut rotor genenartor saat pemutusan waktu tertentu, waktu pemutus kritis dapat dilihat pada tabel 4.10. Secara umum, garis warna biru menunjukkan bahwa generator mampu mempertahankan sinkronisasinya, sedangkan warna merah menunjukkan generator hilang sinkronisasi dan tidak stabil.



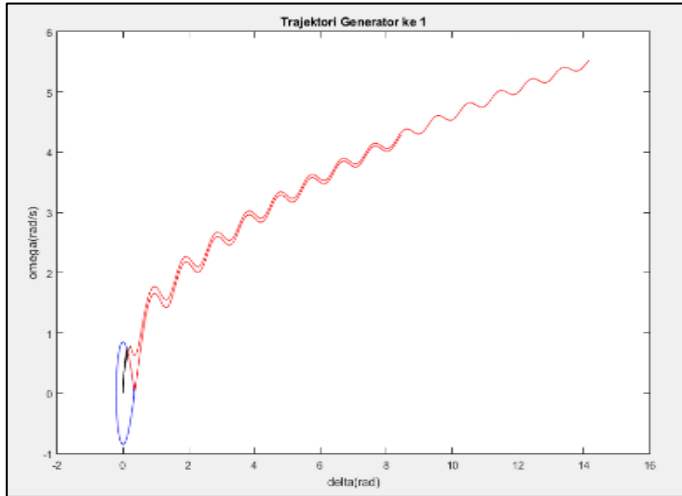
Gambar 4.11 Respon sudut rotor pembangkitan 45% 1 DG

4.1.2.2 Terhubung dengan 2 DG

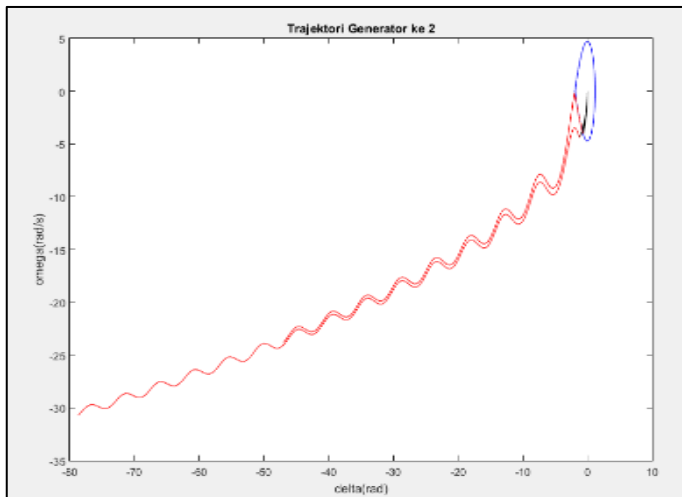
Hasil ini didapatkan dengan mensimulasikan program metode simulasi numerik berbasis *critical trajectory* pada sistem kelistrikan IEEE 13 bus yang telah terhubung dengan 2 DG. Letak masing-masing DG berada pada bus 8 dan bus 5 (telah dioptimasi) dengan prosentase suplai daya aktif setiap DG sebesar 22,5% dan 19% dari total daya aktif beban. DG pertama berjenis diesel dan DG kedua berjenis PV dengan faktor daya masing-masing 0.85 dan 1. Hasil simulasi waktu pemutus kritis dapat dilihat pada tabel 4.11.

Tabel 4.11 Hasil CCT terhubung 2 unit DG

%Pembangkitan DG		45%		38%	
No	Kasus Gangguan	TC Stabil	TC tidak stabil	TC stabil	TC tidak stabil
1	6 – 5	0.312	0.313	0.312	0.313
2	9 – 8	0.399	0.400	0.399	0.400
3	10 – 8	0.435	0.436	0.436	0.437
4	11 – 7	0.332	0.333	0.332	0.333
5	12 – 11	0.348	0.349	0.348	0.349
6	13 – 7	0.340	0.341	0.340	0.341

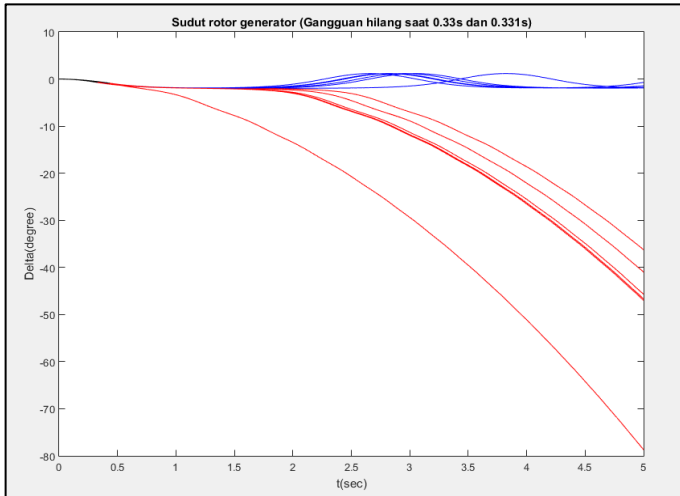


Gambar 4.12 Trajektori generator pusat pembangkitan 38% 2 DG

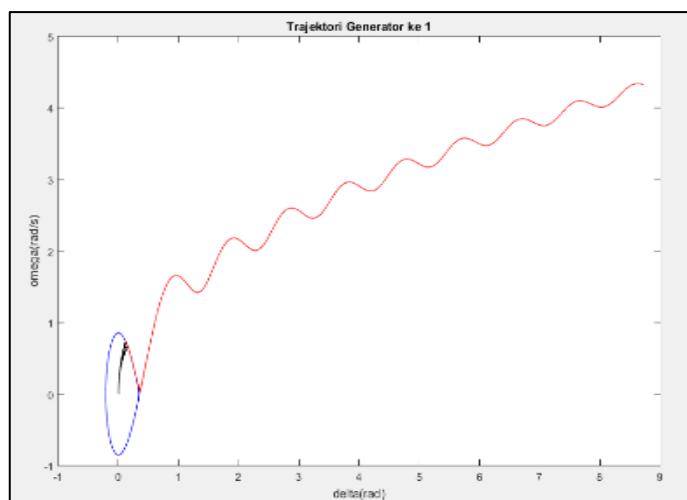


Gambar 4.13 Trajektori generator DG pembangkitan 38% 2 DG

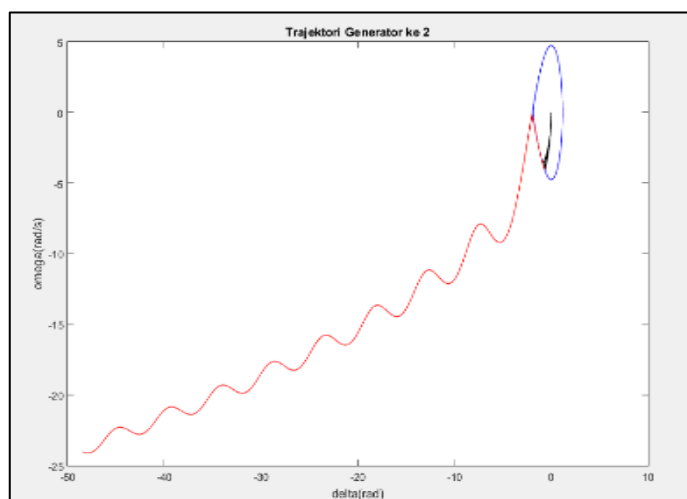
Trajektori generator pertama dan kedua dengan besar pembangkitan total 38% (2 unit DG) dapat dilihat pada gambar 4.12 dan 4.13. Sedangkan respon sudut rotor dari generator dapat dilihat pada gambar 4.14. Respon tersebut hasil pembersihan gangguan dengan waktu yang tertera pada tabel 4.11.



Gambar 4.14 Respon sudut rotor pembangkitan 38% 2 DG

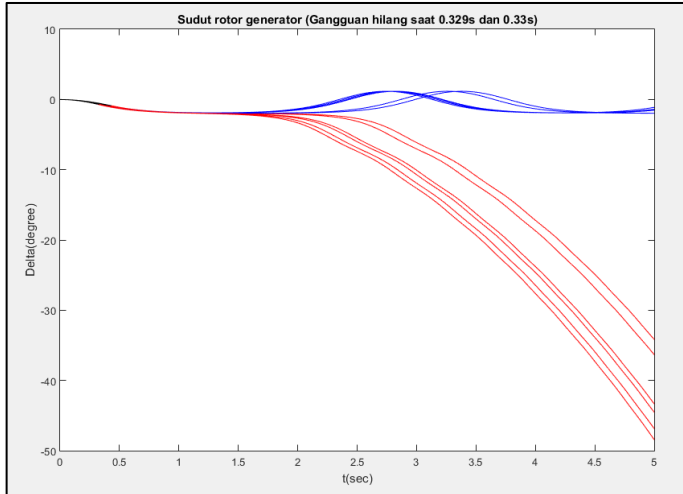


Gambar 4.15 Trajektori generator pusat pembangkitan 45% 2 DG



Gambar 4.16 Trajektori generator DG pembangkitan 45% 2 DG

Gambar 4.15 dan 4.16 menunjukkan trajektori generator pertama dan kedua saat level pembangkitan total sebesar 45% (2 unit DG), sedangkan gambar 4.17 menunjukkan repon sudut rotor saat pemutusan dilakukan sesuai waktu pemutus kritis yang tertera pada tabel 4.11.



Gambar 4.17 Respon sudut rotor pembangkitan 45% 2 DG

4.2 Sistem Kelistrikan IEEE 28 Bus

Pada sub bab ini membahas tentang hasil simulasi stabilitas transien dan tegangan pada sistem kelistrikan IEEE 28 bus.

4.2.1 Hasil Simulasi Stabilitas Tegangan

Pada hasil simulasi stabilitas tegangan ini akan terbagi menjadi 3 bagian, yaitu ketika belum terhubung dengan DG, ketika terhubung 1 unit DG (diesel) dan ketika terhubung dengan 2 unit DG (diesel dan photovoltaic).

4.2.1.1 Tanpa Terhubung DG

Berikut ini adalah hasil simulasi stabilitas tegangan menggunakan metode *continuation power flow* (CPF) tanpa terhubung dengan DG. Tujuan utama dari simulasi ini untuk mendapatkan bus tersensitif terhadap tegangan jatuh saat dilakukan penambahan beban secara terus-menerus (*continue*). Hasil simulasi tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.12 dibawah ini.

Tabel 4.12 Hasil simulasi CPF tanpa terhubung DG

No Bus	Kondisi Awal			Kondisi Akhir		
	Tegangan	Lamda	Beban	Tegangan	Lamda	Beban
	(p.u)	(Kali)	(MW)	(p.u)	(Kali)	(MW)
1	1.0000	0.5	0.0000	1.0000	68,810	14.6011
2	0.9856	0.5	0.0353	0.7913	68,810	14.6011
3	0.9654	0.5	0.0140	0.7838	62,931	5.3002
4	0.9510	0.5	0.0353	0.7611	17,330	3.7038
5	0.9366	0.5	0.0140	0.7693	27,051	2.2863
6	0.9251	0.5	0.0353	0.7245	9,481	2.0424
7	0.9159	0.5	0.0353	0.7033	7,760	1.6780
8	0.9126	0.5	0.0353	0.6877	6,753	1.4650
9	0.9123	0.5	0.0140	0.7117	15,030	1.2765
10	0.9121	0.5	0.0140	0.7055	14,130	1.2010
11	0.9448	0.5	0.0560	0.6945	8,025	2.7526
12	0.9424	0.5	0.0353	0.6916	10,235	2.2019
13	0.9413	0.5	0.0353	0.6828	9,3894	2.0228
14	0.9410	0.5	0.0140	0.7066	21,360	1.8083
15	0.9408	0.5	0.0353	0.6714	8,762	1.8901
16	0.9355	0.5	0.0353	0.7068	9,654	2.0789
17	0.9233	0.5	0.0090	0.7408	30,075	1.6258
18	0.9223	0.5	0.0090	0.7400	27,699	1.4981
19	0.9207	0.5	0.0353	0.6829	7,283	1.5771
20	0.9198	0.5	0.0353	0.6660	6,802	1.4750

Tabel 4.12 Hasil simulasi CPF tanpa terhubung DG (Lanjutan 1)

No Bus	Kondisi Awal			Kondisi Akhir		
	Tegangan	Lamda	Beban	Tegangan	Lamda	Beban
	(p.u)	(Kali)	(MW)	(p.u)	(Kali)	(MW)
21	0.9192	0.5	0.0140	0.6816	13,125	1.1165
22	0.9130	0.5	0.0353	0.6926	6,880	1.4918
23	0.9115	0.5	0.0090	0.7188	22,713	1.2301
24	0.9103	0.5	0.0560	0.6286	4,239	1.4803
25	0.9100	0.5	0.0090	0.7161	20,630	1.1181
26	0.9099	0.5	0.0353	0.6541	6,061	1.3183
27	0.9121	0.5	0.0353	0.6796	6,599	1.4322
28	0.9119	0.5	0.0353	0.6747	6,545	1.4209

Setelah dilakukan simulasi CPF diatas, maka selanjutnya adalah mengurutkan bus mulai dari yang bersensitivitas tinggi hingga rendah, dengan cara menghitung gradien kurva P-V pada setiap bus. Hasil perhitungan gradien kurva P-V dapat dilihat pada tabel 4.13 di bawah ini.

Tabel 4.13 Hasil perhitungan gradien tanpa terhubung DG

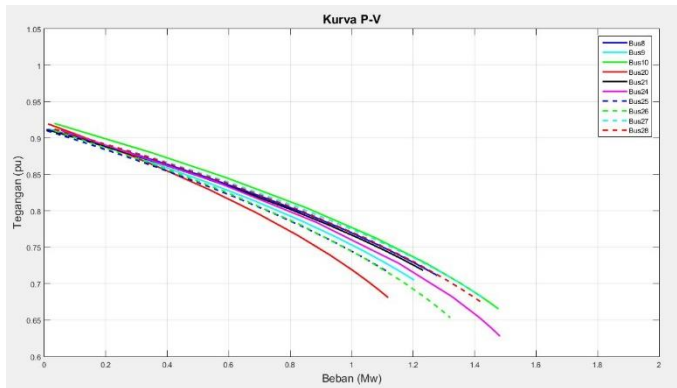
Peringkat	Nomor Bus	ΔV	ΔP	Gradien
		($V_{awal} - V_{akhir}$)	($P_{akhir} - P_{awal}$)	($\Delta V/\Delta P$)
1	21	0.2376	1.1025	0.2155
2	26	0.2557	1.2831	0.1993
3	24	0.2817	1.4243	0.1978
4	20	0.2538	1.4398	0.1762
5	25	0.1940	1.1091	0.1749
6	10	0.2066	1.1870	0.1741
7	28	0.2373	1.3856	0.1713
8	27	0.2324	1.3970	0.1664
9	9	0.2006	1.2625	0.1589
10	23	0.1927	1.2211	0.1578
11	8	0.2249	1.4297	0.1573
12	19	0.2378	1.5418	0.1542
13	22	0.2204	1.4565	0.1513
14	15	0.2694	1.8548	0.1452
15	14	0.2345	1.7943	0.1307
16	13	0.2585	1.9876	0.1301
17	7	0.2126	1.6427	0.1294
18	18	0.1823	1.4891	0.1225
19	12	0.2508	2.1667	0.1158
20	17	0.1825	1.6169	0.1129
21	16	0.2286	2.0436	0.1119

Tabel 4.13 Hasil perhitungan gradien tanpa terhubung DG
(Lanjutan 1)

Peringkat	Nomor Bus	ΔV	ΔP	Gradien
		($V_{awal} - V_{akhir}$)	($P_{akhir} - P_{awal}$)	($\Delta V / \Delta P$)
22	6	0.2006	2.0071	0.0999
23	11	0.2503	2.6966	0.0928
24	5	0.1673	2.2723	0.0736
25	4	0.1899	3.6685	0.0518
26	3	0.1816	5.2862	0.0344
27	2	0.1944	14.5659	0.0133
28	1	0.0000	14.5659	0.0000

Dari tabel 4.13 tersebut didapatkan peringkat teratas 10 bus yang memiliki tingkat sensitivitas tertinggi yaitu bus 21, 26, 24, 20, 25, 10, 28, 27, 9 dan 23. 10 bus tersebut merupakan kandidat yang akan dijadikan sebagai pertimbangan lokasi pemasangan DG pertama (diesel).

Pada gambar 4.18 merupakan ilustrasi kurva P-V ketika sistem tidak terhubung dengan DG.



Gambar 4.18 Kurva P-V IEEE 28 Bus Tanpa DG

4.2.1.2 Terhubung dengan 1 DG

Penambahan DG pertama dilakukan dengan menggunakan metode analitik, sehingga dari 10 bus kandidat tersebut akan didapatkan bus yang memiliki rugi daya aktif terkecil ketika dipasang DG diesel. Suplai daya aktif dari DG pertama ini sebesar 45% dan 50% dari total

daya aktif beban dengan faktor daya sebesar 0.85. Secara matematis, daya aktif dan reaktif DG ketika besar pembangkitan sebesar 45% adalah 0.3425 MW dan 0.1804 MW, sedangkan ketika besar pembangkitan 50% maka daya aktif dan reaktif DG masing – masing 0.3805 MW dan 0.2005 MVAR. Hasil urutan bus yang memiliki rugi daya aktif sistem terkecil ketika dipasang DG pertama dapat dilihat pada tabel 4.14 di bawah ini.

Tabel 4.14 Hasil penentuan lokasi DG pertama IEEE 28 bus

HASIL SIMULASI PENENTUAN LOKASI DG				
Bus Kandidat	Suplay DG 45 %		Suplay DG 50 %	
	Rugi Daya setiap Bus bila Terhubung dengan DG 1 (MH) (kW)	Peringkat (dari yang terkecil)	Rugi Daya setiap Bus bila Terhubung dengan DG 1 (MH) (kW)	Peringkat (dari yang terkecil)
21	47.1791	10	45.1268	10
26	38.6867	7	35.4094	7
24	37.8299	1	34.3433	1
20	43.7595	9	40.7185	9
25	38.2889	5	34.9174	3
10	39.5919	8	36.3968	8
28	38.2269	3	34.9361	4
27	37.9277	2	34.5655	2
9	38.2614	4	34.9519	5
23	38.4038	6	35.0156	6

Dari tabel 4.14 dapat diketahui bahwa memasang DG pada bus 24 dengan pembangkitan daya aktif sebesar 45% dan 38%, akan didapatkan rugi daya aktif pada sistem yang sangat kecil jika dibandingkan dengan memasang DG pada bus yang lain. Oleh karenanya, pemasangan DG pertama diletakkan pada bus 24. Prosedur selanjutnya adalah menjalankan program CPF pada sistem kelistrikan yang telah terhubung dengan 1 unit DG dengan suplai daya aktif yang berbeda. Hasil simulasi tersebut telah disajikan pada tabel 4.15 di bawah ini.

Tabel 4.15 Hasil simulasi CPF terhubung 1 DG

No Bus	Suplay DG 45 %				Suplay DG 50 %			
	Kondisi Awal		Kondisi Akhir		Kondisi Awal		Kondisi Akhir	
	V ₁	Load ₁	V ₂	Load ₂	V ₁	Load ₁	V ₂	Load ₂
	(p.u)	(MW)	(p.u)	(MW)	(p.u)	(MW)	(p.u)	(MW)
1	1.0000	0.0000	1.0000	16,972	1.0000	0.0000	1.0000	16,9750
2	0.9909	0.0353	0.7534	16,972	0.9915	0.0353	0,7545	16,9750

Tabel 4.15 Hasil simulasi CPF terhubung 1 DG (Lanjutan 1)

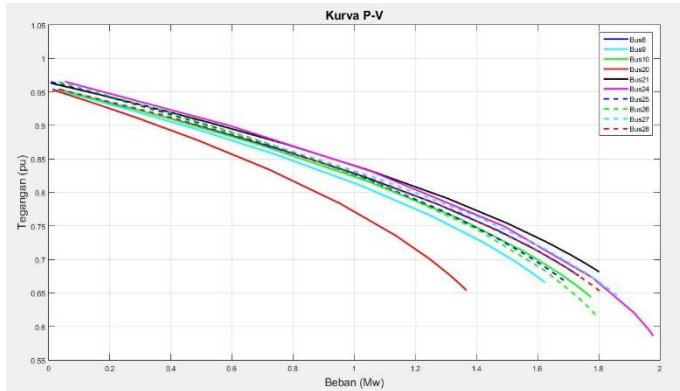
No Bus	Suplay DG 45 %				Suplay DG 50 %			
	Kondisi Awal		Kondisi Akhir		Kondisi Awal		Kondisi Akhir	
	V ₁	Load ₁	V ₂	Load ₂	V ₁	Load ₁	V ₂	Load ₂
	(p.u)	(MW)	(p.u)	(MW)	(p.u)	(MW)	(p.u)	(MW)
3	0,9785	0.0140	0,7506	6,437	0,9798	0.0140	0,7374	6,7190
4	0,9699	0.0353	0,7237	4,636	0,9718	0.0353	0,7277	4,6387
5	0,9635	0.0140	0,7153	3,217	0,9662	0.0140	0,7126	3,2843
6	0,9589	0.0353	0,6933	2,674	0,9624	0.0353	0,6910	2,7334
7	0,9577	0.0353	0,6781	2,224	0,9621	0.0353	0,6668	2,3142
8	0,9546	0.0353	0,6479	1,941	0,9589	0.0353	0,6543	1,9587
9	0,9543	0.0140	0,6765	1,732	0,9586	0.0140	0,6820	1,7481
10	0,9541	0.0140	0,6663	1,622	0,9584	0.0140	0,6699	1,6425
11	0,9639	0.0560	0,6681	3,154	0,9658	0.0560	0,6725	3,1568
12	0,9614	0.0353	0,6661	2,513	0,9634	0.0353	0,6700	2,5164
13	0,9604	0.0353	0,6727	2,236	0,9623	0.0353	0,6572	2,3125
14	0,9601	0.0140	0,6890	2,053	0,9621	0.0140	0,6899	2,0660
15	0,9599	0.0353	0,6542	2,102	0,9618	0.0353	0,6567	2,1089
16	0,9624	0.0353	0,6701	2,558	0,9652	0.0353	0,6758	2,5632
17	0,9572	0.0090	0,7102	2,169	0,9607	0.0090	0,7156	2,1795
18	0,9563	0.0090	0,6990	2,041	0,9597	0.0090	0,6973	2,0834
19	0,9546	0.0353	0,6505	1,958	0,9581	0.0353	0,6542	1,9755
20	0,9538	0.0353	0,6447	1,772	0,9573	0.0353	0,6519	1,7779
21	0,9532	0.0140	0,6549	1,365	0,9567	0.0140	0,6525	1,3888
22	0,9606	0.0353	0,6485	2,073	0,9655	0.0353	0,6553	2,0978
23	0,9630	0.0090	0,6822	1,799	0,9683	0.0090	0,6752	1,8691
24	0,9652	0.0560	0,5871	1,976	0,9708	0.0560	0,5668	2,0491
25	0,9649	0.0090	0,6673	1,690	0,9706	0.0090	0,6608	1,7524
26	0,9648	0.0353	0,6144	1,796	0,9704	0.0353	0,6120	1,8418
27	0,9541	0.0353	0,6462	1,860	0,9584	0.0353	0,6410	1,9077
28	0,9540	0.0353	0,6505	1,810	0,9583	0.0353	0,6451	1,8572

Setelah dilakukan simulasi CPF diatas, maka selanjutnya adalah mengurutkan bus mulai dari yang bersensitivitas tinggi hingga rendah, dengan cara menghitung gradien kurva P-V pada setiap bus. Hasil perhitungan gradien kurva P-V yang telah terhubung dengan 1 unit DG dengan besar suplai daya aktif yang berbeda dapat dilihat pada tabel 4.16 di bawah ini.

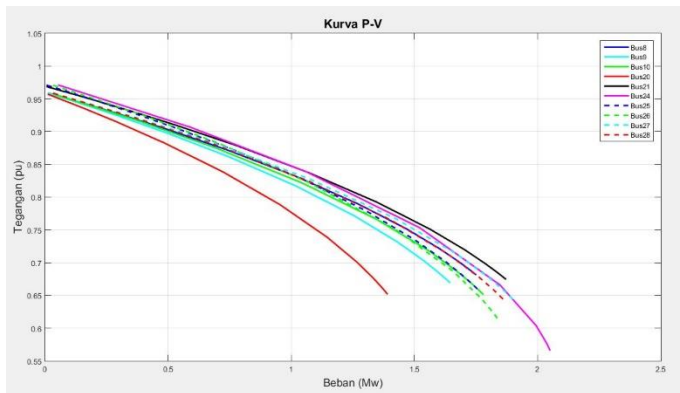
Tabel 4.16 Hasil perhitungan gradien terhubung 1 DG

Rank	Suplay DG 45 %				Suplay DG 50 %			
	No Bus	ΔV	ΔL	Gradien	No Bus	ΔV	ΔL	Gradien
		V_1-V_2	L_2-L_1	$(\Delta V/\Delta L)$		V_1-V_2	L_2-L_1	$(\Delta V/\Delta L)$
1	21	0,2983	1,351	0,2208	21	0,3041	1,374	0,2212
2	26	0,3503	1,760	0,1990	24	0,4039	1,993	0,2026
3	24	0,3780	1,920	0,1968	26	0,3584	1,806	0,1984
4	10	0,2878	1,608	0,1789	25	0,3098	1,743	0,1777
5	20	0,3091	1,737	0,1779	10	0,2885	1,628	0,1772
6	25	0,2976	1,681	0,1770	20	0,3054	1,742	0,1752
7	28	0,3035	1,774	0,1710	28	0,3132	1,821	0,1719
8	27	0,3079	1,825	0,1687	27	0,3174	1,872	0,1695
9	9	0,2778	1,718	0,1616	9	0,2766	1,734	0,1595
10	8	0,3066	1,905	0,1609	8	0,3046	1,923	0,1583
11	19	0,3040	1,923	0,1581	23	0,2931	1,860	0,1576
12	23	0,2807	1,790	0,1568	19	0,3039	1,940	0,1566
13	22	0,3120	2,037	0,1531	22	0,3101	2,062	0,1503
14	15	0,3056	2,066	0,1479	15	0,3051	2,073	0,1471
15	14	0,2711	2,039	0,1329	13	0,3051	2,277	0,1339
16	13	0,2877	2,200	0,1307	14	0,2721	2,052	0,1326
17	7	0,2797	2,189	0,1277	7	0,2952	2,278	0,1295
18	18	0,2572	2,032	0,1265	18	0,2623	2,074	0,1264
19	12	0,2953	2,478	0,1191	12	0,2934	2,481	0,1182
20	16	0,2922	2,523	0,1158	16	0,2893	2,527	0,1144
21	17	0,2469	2,160	0,1143	17	0,2450	2,170	0,1129
22	6	0,2656	2,639	0,1006	6	0,2714	2,698	0,1005
23	11	0,2957	3,098	0,0954	11	0,2933	3,100	0,0945
24	5	0,2481	3,202	0,0774	5	0,2535	3,270	0,0775
25	4	0,2462	4,600	0,0535	4	0,2441	4,603	0,0530
26	3	0,2278	6,423	0,0354	3	0,2424	6,705	0,0361
27	2	0,2375	16,937	0,0140	2	0,2369	16,939	0,0139
28	1	0,0000	16,937	0,0000	1	0,0000	16,939	0,0000

Dari tabel 4.16 tersebut didapatkan peringkat teratas 10 bus yang memiliki tingkat sensitivitas tertinggi yaitu bus 21, 26, 24, 10, 20, 25, 28, 27, 9 dan 8. 10 bus tersebut merupakan kandidat yang akan dijadikan sebagai pertimbangan lokasi pemasangan DG kedua (photovoltaic). Gradien tersebut akan diilustrasikan pada gambar 4.19 dan 4.20 dalam bentuk kurva P-V dengan besar pembangkitan yang berbeda.



Gambar 4.19 Kurva P-V IEEE 28 Bus 1 Unit DG 45%



Gambar 4.20 Kurva P-V IEEE 28 Bus 1 Unit DG 50%

4.2.1.3 Terhubung dengan 2 DG

Penambahan DG kedua dilakukan dengan menggunakan metode analitik, dari 10 bus kandidat tersebut akan didapatkan bus yang memiliki rugi daya aktif terkecil ketika dipasang DG dengan jenis *photovoltaic*. Dengan mempertimbangkan pembangkitan total semua DG sebesar 45% dan 50% dari jumlah daya aktif beban, maka suplai daya aktif dari DG pertama dan kedua ini sebesar 22.5% dan 25% dari total daya aktif beban. DG pertama dan kedua menggunakan faktor daya masing-masing 0.85

dan 1. Secara matematis, saat pembangkitan setiap DG sebesar 22,5%, maka suplai daya aktif dan reaktif DG pertama sebesar 0.1712 MW dan 0.0902 MVAR., sedangkan DG kedua sebesar 0.1712 MW. Saat pembangkitan setiap DG sebesar 25% maka suplai daya aktif dan reaktif DG pertama sebesar 0.1903 MW dan 0.1002 MVAR, sedangkan DG kedua sebesar 0.1903 MW. Hasil urutan bus yang memiliki rugi daya terkecil ketika dipasang DG kedua dapat dilihat pada tabel 4.17.

Tabel 4.17 Hasil penentuan lokasi DG kedua IEEE 28 bus

HASIL SIMULASI PENENTUAN LOKASI DG				
Bus Kandidat	Suplay DG 45 %		Suplay DG 50 %	
	Rugi Daya setiap Bus bila Terhubung dengan DG 2 (PV) (kW)	Peringkat (dari yang terkecil)	Rugi Daya setiap Bus bila Terhubung dengan DG 2 (PV) (kW)	Peringkat (dari yang terkecil)
21	37.719,9	6	33.8762	8
26	37.968,9	8	59.0864	10
24	62.609,2	10	34.3557	9
10	37.775,5	7	32.9691	6
20	38.063,5	9	32.0834	5
25	37.707,5	5	33.3879	7
28	35.654,0	2	31.6433	2
27	35.600,9	1	31.5738	1
9	35.706,5	3	31.6979	3
8	35.899,9	4	31.7997	4

Dari tabel 4.17 dapat diketahui dengan memasang DG kedua pada bus 27 rugi daya aktif pada sistem akan semakin kecil jika dibandingkan dengan memasang DG pada bus yang lain. Oleh karenanya, pemasangan DG kedua diletakkan pada bus 27.

Setelah mendapatkan lokasi pemasangan DG, maka prosedur selanjutnya adalah menjalankan program CPF pada sistem kelistrikan yang telah terhubung dengan 2 unit DG (bus 8 dan bus 5). Hasil simulasi tersebut telah disajikan pada tabel 4.18 di bawah ini.

Tabel 4.18 Hasil simulasi CPF terhubung 2 DG

No Bus	Suplay DG 45 %				Suplay DG 50 %			
	Kondisi Awal		Kondisi Akhir		Kondis Awal		Kondisi Akhir	
	V_1	$Load_1$	V_2	$Load_2$	V_1	$Load_1$	V_2	$Load_2$
	(p.u)	(MW)	(p.u)	(MW)	(p.u)	(MW)	(p.u)	(MW)
1	1.0000	0.000	1.0000	16,972	1.0000	0.000	1.0000	17,2110

2	0,9910	0.0353	0,7535	16,972	0,9915	0.0353	0,7493	17,2110
3	0,9786	0.0140	0,7508	6,438	0,9799	0.0140	0,7371	6,7300
4	0,9700	0.0353	0,7241	4,636	0,9720	0.0353	0,7243	4,6837
5	0,9636	0.0140	0,7146	3,227	0,9664	0.0140	0,7134	3,2845
6	0,9591	0.0353	0,6878	2,708	0,9626	0.0353	0,6919	2,7343
7	0,9580	0.0353	0,6642	2,283	0,9624	0.0353	0,6683	2,3150
8	0,9583	0.0353	0,6517	1,975	0,9630	0.0353	0,6410	2,0475
9	0,9580	0.0140	0,6807	1,759	0,9628	0.0140	0,6720	1,8264
10	0,9578	0.0140	0,6695	1,648	0,9626	0.0140	0,6678	1,6885
11	0,9640	0.0560	0,6685	3,154	0,9659	0.0560	0,6729	3,1568
12	0,9615	0.0353	0,6664	2,514	0,9635	0.0353	0,6703	2,5169
13	0,9605	0.0353	0,6563	2,300	0,9625	0.0353	0,6576	2,3125
14	0,9602	0.0140	0,6892	2,053	0,9622	0.0140	0,6779	2,1169
15	0,9600	0.0353	0,6526	2,108	0,9620	0.0353	0,6571	2,1089
16	0,9625	0.0353	0,6706	2,558	0,9653	0.0353	0,6751	2,5695
17	0,9573	0.0090	0,7108	2,169	0,9609	0.0090	0,7075	2,2256
18	0,9564	0.0090	0,6989	2,044	0,9600	0.0090	0,6982	2,0834
19	0,9548	0.0353	0,6513	1,959	0,9584	0.0353	0,6544	1,9781
20	0,9540	0.0353	0,6454	1,773	0,9575	0.0353	0,6358	1,8214
21	0,9534	0.0140	0,6554	1,365	0,9569	0.0140	0,6493	1,3975
22	0,9580	0.0353	0,6575	2,015	0,9627	0.0353	0,6526	2,0730
23	0,9585	0.0090	0,6775	1,766	0,9634	0.0090	0,6827	1,7900
24	0,9591	0.0560	0,5756	1,927	0,9641	0.0560	0,5814	1,9574
25	0,9588	0.0090	0,6623	1,645	0,9639	0.0090	0,6658	1,6730
26	0,9587	0.0353	0,6259	1,715	0,9637	0.0353	0,6168	1,7686
27	0,9588	0.0353	0,6377	1,937	0,9637	0.0353	0,6458	1,9561
28	0,9587	0.0353	0,6335	1,906	0,9635	0.0353	0,6384	1,9333

Setelah dilakukan simulasi CPF diatas, maka selanjutnya adalah menghitung gradien kurva P-V pada setiap bus untuk digunakan analisa stabilitas tegangan ketika dilakukan penambahan beban secara terus-menerus (*continue*). Hasil perhitungan gradien kurva P-V saat terhubung dengan 2 unit DG dapat dilihat pada tabel 4.19

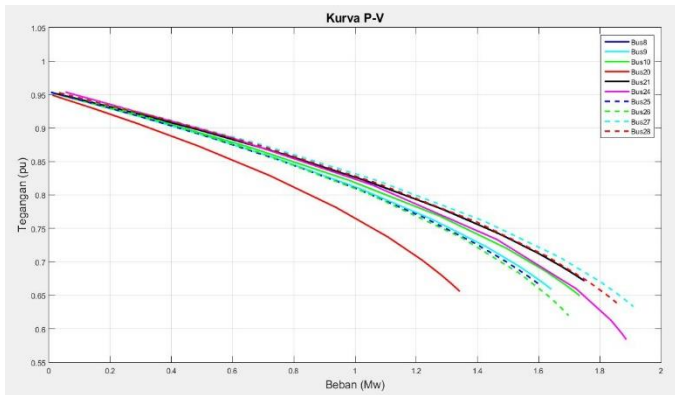
Tabel 4.19 Hasil perhitungan gradien saat terhubung 2 DG

Rank	Suplay DG 45 %				Suplay DG 50 %			
	No Bus	ΔV	ΔL	Gradien ($\Delta V/\Delta L$)	No Bus	ΔV	ΔL	Gradien ($\Delta V/\Delta L$)
		V_1-V_2	L_2-L_1			V_1-V_2	L_2-L_1	
1	21	0,2979	1,351	0,2204	21	0,3076	1,383	0,2223
2	24	0,3834	1,871	0,2049	24	0,3827	1,901	0,2013
3	26	0,3327	1,679	0,1980	26	0,3469	1,733	0,2001
4	25	0,2964	1,636	0,1812	20	0,3217	1,786	0,1801

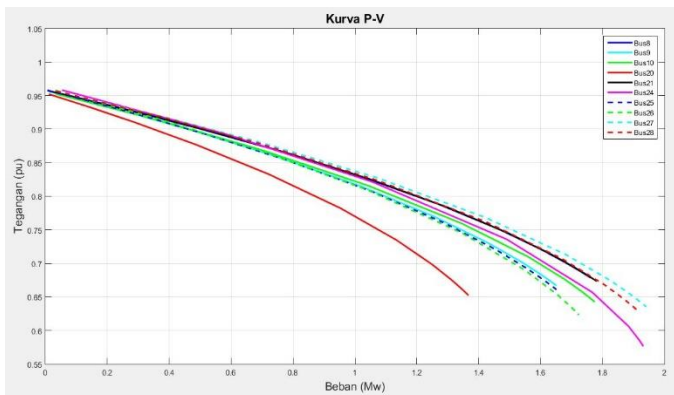
Tabel 4.19 Hasil perhitungan gradien saat terhubung 2 DG (Lanjutan 1)

Rank	Suplay DG 45 %				Suplay DG 50 %			
	No Bus	ΔV	ΔL	Gradien	No Bus	ΔV	ΔL	Gradien
		V_1-V_2	L_2-L_1	$(\Delta V/\Delta L)$		V_1-V_2	L_2-L_1	$(\Delta V/\Delta L)$
5	20	0,3085	1,737	0,1775	25	0,2980	1,664	0,1791
6	10	0,2883	1,634	0,1763	10	0,2948	1,674	0,1760
7	28	0,3252	1,870	0,1738	28	0,3251	1,898	0,1713
8	27	0,3211	1,901	0,1688	27	0,3178	1,920	0,1654
9	23	0,2809	1,757	0,1598	9	0,2907	1,812	0,1604
10	9	0,2773	1,744	0,1589	8	0,3220	2,012	0,1600
11	8	0,3066	1,940	0,1580	23	0,2807	1,781	0,1576
12	19	0,3035	1,923	0,1577	19	0,3039	1,942	0,1564
13	22	0,3005	1,979	0,1518	22	0,3101	2,037	0,1522
14	15	0,3073	2,073	0,1482	15	0,3048	2,073	0,1470
15	13	0,3042	2,264	0,1343	14	0,2843	2,102	0,1352
16	14	0,2709	2,039	0,1328	13	0,3048	2,277	0,1338
17	7	0,2937	2,247	0,1306	7	0,2940	2,279	0,1290
18	18	0,2574	2,035	0,1264	18	0,2617	2,074	0,1261
19	12	0,2951	2,478	0,1190	12	0,2932	2,481	0,1181
20	16	0,2918	2,523	0,1156	16	0,2901	2,534	0,1144
21	17	0,2465	2,160	0,1141	17	0,2533	2,216	0,1142
22	6	0,2712	2,673	0,1014	6	0,2706	2,699	0,1002
23	11	0,2954	3,098	0,0953	11	0,2929	3,100	0,0944
24	5	0,2490	3,213	0,0775	5	0,2530	3,270	0,0773
25	4	0,2459	4,600	0,0534	4	0,2477	4,648	0,0532
26	3	0,2277	6,424	0,0354	3	0,2428	6,716	0,0361
27	2	0,2374	16,937	0,0140	2	0,2421	17,176	0,0141
28	1	0,0000	16,937	0,0000	1	0,0000	17,176	0,0000

Gradien diatas akan diilustrasikan dalam bentuk kurva P-V dengan level pembangkitan yang berbeda seperti yang disajikan pada gambar 4.21 dan 4.22.



Gambar 4.21 Kurva P-V IEEE 28 Bus 2 Unit DG 45%



Gambar 4.22 Kurva P-V IEEE 28 Bus 2 Unit DG 50%

Dengan adanya penambahan DG yang penempatannya ditentukan secara analitik memberikan beberapa pengaruh terhadap sistem diantaranya, kenaikan nilai indeks tegangan sistem dan rugi daya sistem dapat diminimalkan. Besar pengaruh dapat dilihat pada tabel 4.20.

Tabel 4.20 Pengaruh DG terhadap indeks tegangan dan rugi daya

Tanpa DG	Indeks Tegangan Sebelum Terhubung DG	0.150855	
	Rugi Daya Sistem Sebelum Terhubung DG	Daya Aktif	72310.4000 Watt
		Daya Reaktif	49428.5660 VAR
Suplai DG 45 %	Indeks Tegangan Terhubung 1 unit DG (Bus 8)	0.042439	
	Rugi Daya Sistem Terhubung 1 unit DG (Bus 8)	Daya Aktif	29420.5333 Watt
		Daya Reaktif	19005.2201 VAR
Suplai DG 50 %	Indeks Tegangan Terhubung 1 unit DG (Bus 8)	0.035207	
	Rugi Daya Sistem Terhubung 1 unit DG (Bus 8)	Daya Aktif	27246.7168 Watt
		Daya Reaktif	17298.3342 VAR
Suplai DG 45 %	Indeks Tegangan Terhubung 2 unit DG (Bus 8 dan 5)	0.042408	
	Rugi Daya Sistem Terhubung 2 unit DG (Bus 8 dan 5)	Daya Aktif	27190.9343 Watt
		Daya Reaktif	18030.0237 VAR
Suplai DG 50 %	Indeks Tegangan Terhubung 2 unit DG (Bus 8 dan 5)	0.035050	
	Rugi Daya Sistem Terhubung 2 unit DG (Bus 8 dan 5)	Daya Aktif	24468.1507 Watt
		Daya Reaktif	16091.6382 VAR

4.2.2 Hasil Simulasi Stabilitas Transien

Hasil simulasi stabilitas transien pada sub bab ini terbagi menjadi 2, yaitu ketika terhubung 1 unit DG dan 2 unit DG. Indikator yang diamati dalam simulasi ini adalah waktu pemutus kritis, respon sudut rotor, dan trajektori generator.

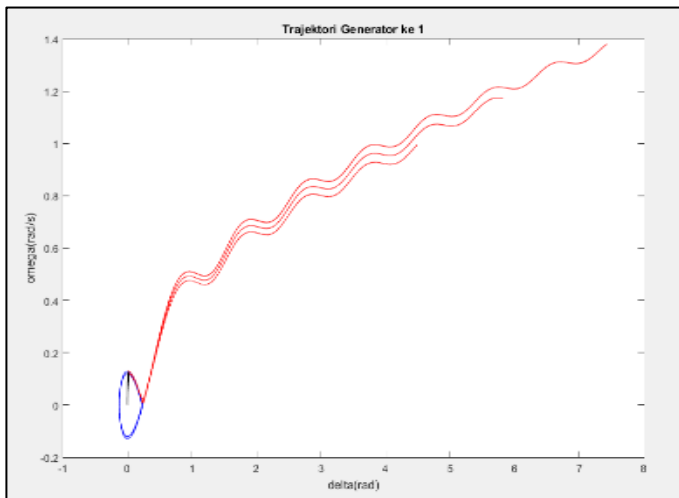
4.2.2.1 Terhubung dengan 1 DG

Pada skenario simulasi ini dilakukan dengan menghubungkan 1 unit DG pada sistem kelistrikan IEEE 28 bus di bus 24 yang letaknya telah dioptimasi pada sub bab sebelumnya. Besar prosentase suplai daya aktif dari DG dibagi menjadi dua, yaitu sebesar 45% dan 50% dengan faktor daya sebesar 0.85.

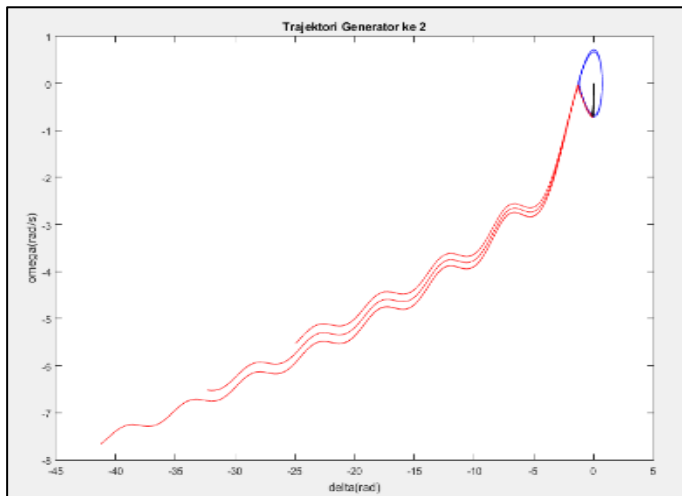
Hasil simulasi waktu pemutus kritis yang didapatkan dari program metode simulasi numerik berbasis *critical trajectory* dapat dilihat pada tabel 4.21 di bawah ini.

Tabel 4.21 Hasil CCT terhubung 1 unit DG

% Pembangkitan DG		45%		50%	
No	Kasus Gangguan	TC Stabil	TC tidak stabil	TC stabil	TC tidak stabil
1	10 - 9	0.473	0.474	0.470	0.471
2	11 - 4	1.410	1.411	1.400	1.401
3	9 - 8	0.393	0.394	0.390	0.391
4	16 - 5	0.827	0.828	0.822	0.823
5	17 - 6	0.470	0.471	0.467	0.468
6	26 - 25	0.054	0.055	0.053	0.054

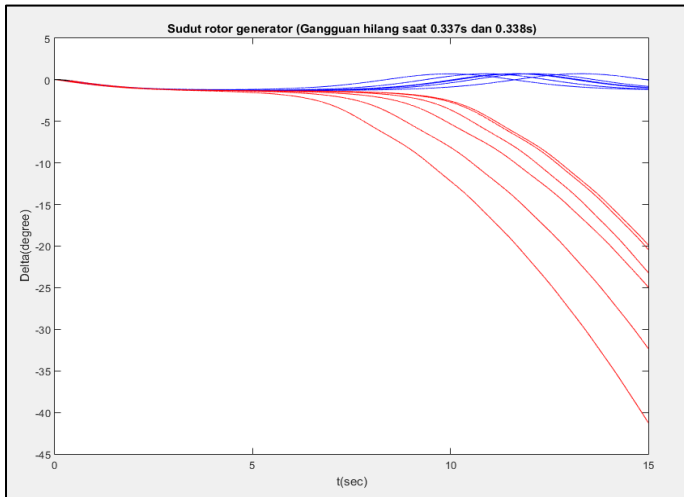


Gambar 4.23 Trajektori generator pusat pembangkitan 45% 1 DG

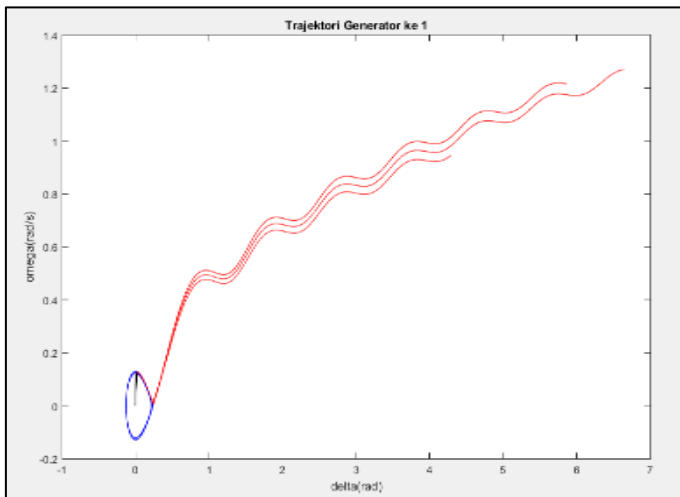


Gambar 4.24 Trajektori generator DG pembangkitan 45% 1 DG

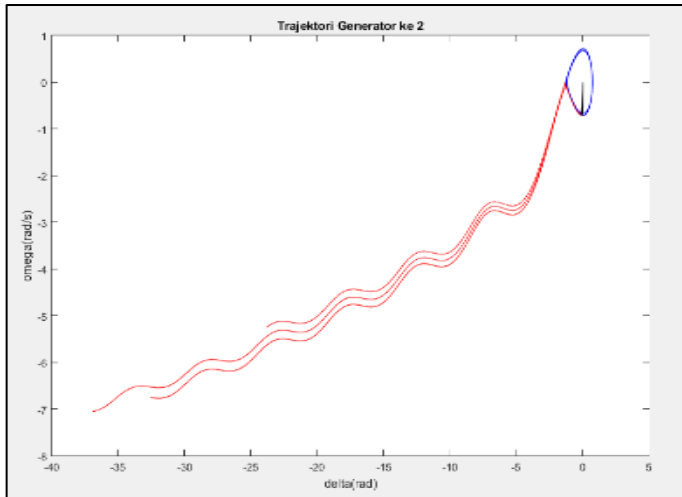
Gambar 4.23 dan 4.24 menunjukkan trajektori generator pertama dan kedua dengan level pembangkitan sebesar 45%. Sedangkan gambar 4.25 menunjukkan respon dari sudut rotor generator pada saat pembersihan gangguan dilakukan sesuai dengan waktu yang tertera pada tabel 4.21. Pada intinya, garis warna merah menunjukkan bahwa generator dalam keadaan tidak stabil atau lepas dari sinkronisasi. Sedangkan garis warna biru menunjukkan generator dalam keadaan stabil.



Gambar 4.25 Respon sudut rotor pembangkitan 45% 1 DG

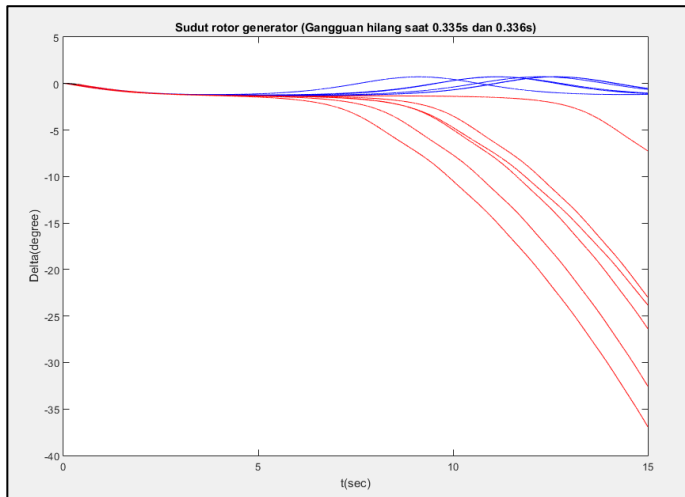


Gambar 4.26 Trajektori generator pusat pembangkitan 50% 1 DG



Gambar 4.27 Trajektori generator DG pembangkitan 50% 1 DG

Trajektori generator pertama dan kedua saat level pembangkitan sebesar 50% dapat dilihat pada gambar 4.26 dan 4.27. Sedangkan respon sudut rotor generator dapat dilihat pada gambar 4.28. Secara visual garis warna biru menandakan bahwa generator berada dalam kondisi stabil sedangkan garis warna merah menunjukkan dalam keadaan tidak stabil.



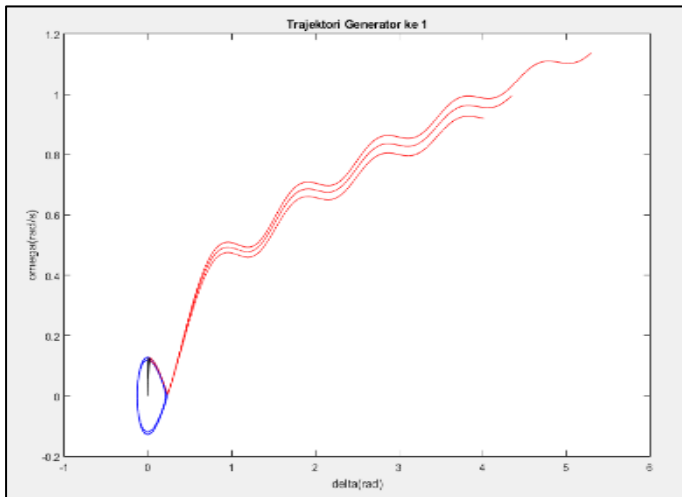
Gambar 4.28 Respon sudut rotor pembangkitan 50% 1 DG

4.2.2.2 Terhubung dengan 2 DG

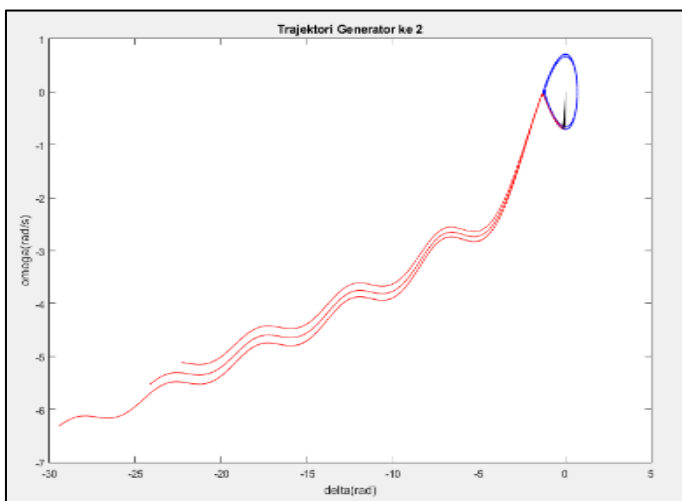
Hasil ini didapatkan dengan mensimulasikan program metode simulasi numerik berbasis *critical trajectory* pada sistem kelistrikan IEEE 28 bus yang telah terhubung dengan 2 DG. Letak masing-masing DG berada pada bus 24 dan bus 27 (telah dioptimasi) dengan prosentase suplai daya aktif setiap DG sebesar 22,5% dan 25%. DG pertama berupa diesel sedangkan DG kedua berupa photovoltaic dengan faktor daya masing-masing 0,85 dan 1. Hasil simulasi waktu pemutus kritis dapat dilihat pada tabel 4.22.

Tabel 4.22 Hasil CCT saat terhubung 2 DG

% Pembangkitan DG		45 %		50 %	
No	Kasus Gangguan	TC Stabil	TC tidak stabil	TC stabil	TC tidak stabil
1	10 - 9	0.482	0.483	0.480	0.481
2	11 - 4	1.445	1.446	1.438	1.439
3	9 - 8	0.401	0.402	0.399	0.400
4	16 - 5	0.845	0.846	0.842	0.843
5	17 - 6	0.480	0.481	0.478	0.479
6	26 - 25	0.055	0.056	0.055	0.056

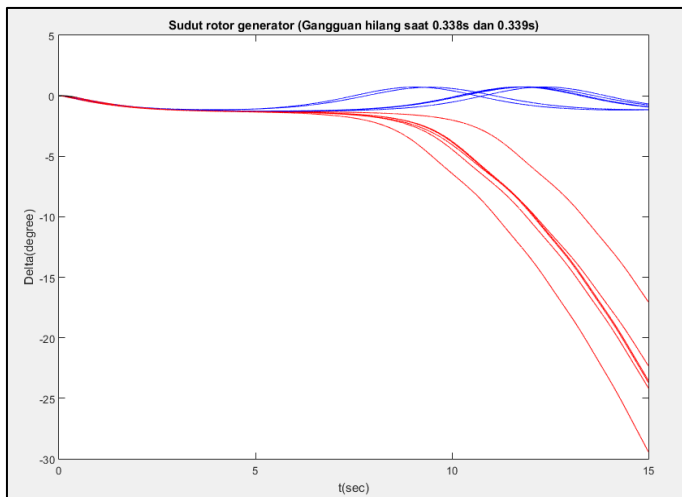


Gambar 4.29 Trajektori generator pusat pembangkitan 45% 2 DG

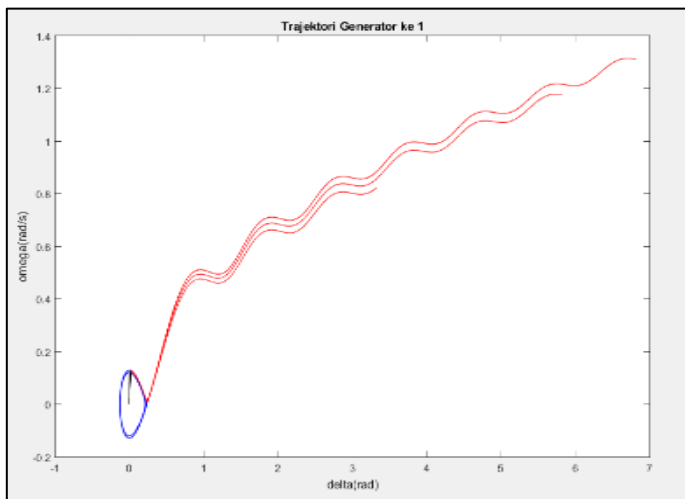


Gambar 4.30 Trajektori generator DG pembangkitan 45% 2 DG

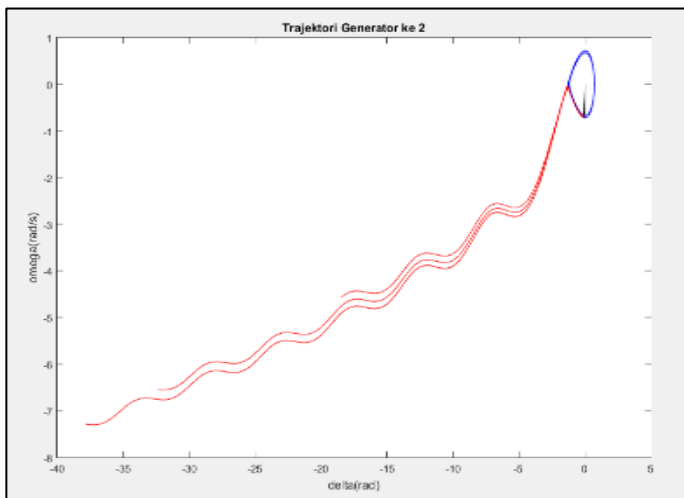
Gambar di atas menunjukkan suatu kondisi stabilitas dengan perbedaan pembersihan gangguan sebesar 0.001 detik, sesuai dengan tabel 4.22. Dengan perbedaan tersebut dapat lihat garis warna biru yang menunjukkan bahwa generator dalam kondisi stabil, sedangkan garis warna merah menunjukkan generator dalam kondisi tidak stabil. Hal tersebut dapat amati pada trajektori (gambar 4.29 dan 4.30) dan respon sudut rotor generator (gambar 4.31).



Gambar 4.31 Respon sudut rotor pembangkitan 45% 2 DG

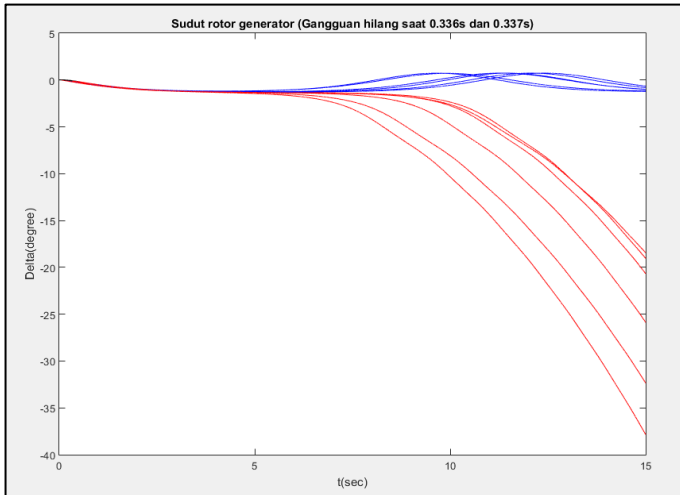


Gambar 4.32 Trajektori generator pusat pembangkitan 50% 2 DG



Gambar 4.33 Trajektori generator DG pembangkitan 50% 2 DG

Pada saat level pembangkitan sebesar 50% dengan dua unit DG (masing-masing 25%) dapat lihat trajektori generator pada gambar 4.32 dan 4.33 dan respon sudut rotor pada gambar 4.34. Terdapat perbedaan kondisi stabilitas pada gambar tersebut. Hal tersebut terjadi akibat dari perbedaan dari waktu pemutus kritis sebesar 0.001 detik yang digunakan dalam pembersihan gangguan.



Gambar 4.34 Respon sudut rotor pembangkitan 50% 2 DG

4.3 Analisis Stabilitas Transien dan Tegangan

Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan, didapatkan analisis sebagai berikut :

1. Penempatan DG dengan mempertimbangkan sensitivitas bus dapat mengurangi rugi daya aktif sistem yang cukup signifikan.
2. Dari hasil simulasi stabilitas transien didapatkan bahwa waktu pemutus kritis dari DG kombinasi (*hybrid*) lebih besar daripada DG tidak berkombinasi.
3. Dari hasil simulasi stabilitas tegangan menunjukkan bahwa semakin besar pembangkitan daya aktif DG, profil tegangan semakin meningkat, titik beban maksimum meningkat dan indek tegangan semakin baik.

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Penempatan DG dengan mempertimbangkan sensitivitas bus terhadap penambahan beban dapat mengurangi rugi daya aktif sistem yang cukup signifikan.
2. Berdasarkan metode analitik lokasi penempatan DG pada sistem IEEE 13 bus didapat pada bus 8 dan 5 dengan presentasi pembangkitan daya aktif sebesar 38% dan 45% dari total daya aktif beban.
3. Berdasarkan metode analitik lokasi penempatan DG pada sistem IEEE 28 bus didapat pada bus 24 dan 27 dengan presentasi pembangkitan daya aktif sebesar 45% dan 50% dari total daya aktif beban.
4. Dalam stabilitas transien, secara umum waktu pemutus kritis (CCT) *hybrid DG* lebih besar daripada *non-hybrid DG*.
5. Dalam stabilitas tegangan, semakin besar pembangkitan daya aktif DG, semakin besar kenaikan profil tegangan, titik beban maksimum (MLP), dan semakin baik indek tegangan sistem.

5.2 Saran

Untuk memperbaiki kualitas tugas akhir dan penelitian kedepannya, maka dengan ini ada beberapa saran yang perlu dipertimbangkan :

1. Diperlukan pengembangan terkait penentuan ukuran DG yang optimal untuk memperbaiki profil tegangan dan meminimalisir rugi daya sistem.
2. Diperlukan pengembangan terkait model infinite bus dan perhitungan pengaruh dari damping.
3. Diperlukan perbandingan antara waktu pemutus kritis dari metode simulasi numerik berbasis *critical trajectory* dengan *direct method critical trajectory* untuk validitas metode.

Halaman ini sengaja dikosongkan

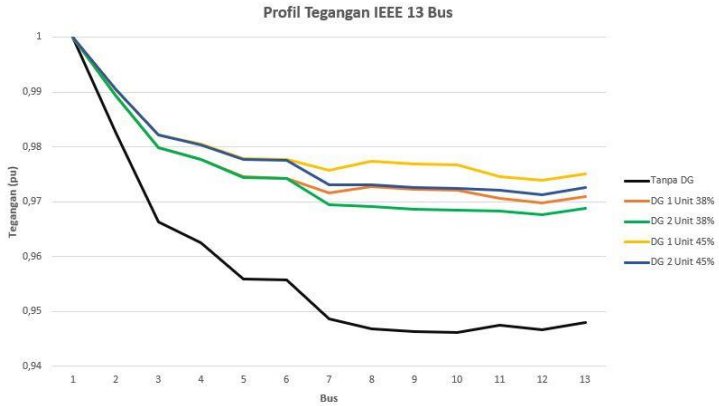
DAFTAR PUSTAKA

- [1] IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, "Definitions and Classifications of Power System Stability", IEEE vol. 19, 2004.
- [2] Ardyono P., "*Buku bahan ajar kestabilan transien*"
- [3] K. Purchala, R. Belmans. "*Distributed Generation and Grid Integration Issues*". Imperial College, London (2003)
- [4] W.El-Khattam, M.M.A. Salama, "*Distributed Generation Technologies, Definitions and Benefits*", *ELSEVIER Electric Power System Ressearch* 71 (2004) 119-129, Jan.2004
- [5] Thomas Ackerman, Goran Andersson, Lennart Soder, *Distributed Generation: a definition*. Electric Power Systems Research 57, Elsevier, 2001, pp.195-204
- [6] F. Arfanizar, P. Ardyono, Soedibyo, "*Analisis Stabilitas Transien dan Tegangan pada Sistem Tenaga Listrik akibat Instalasi Pembangunan Terdistribusi*", Jurnal Teknik ITS, Surabaya (2016)
- [7] Md S. E. Sharif, Md M.Z. Khan, Md Moniruzzaman, A. Bose, "*Design, Simulation and Stability Analysis of Wind-PV-Diesel Hybrid Power System Using ETAP*", American Journal of Modern Energy, 2017, pp.121-130
- [8] Short T.A, "*Electric Power Distribution Handbook*", CRC Press, United State of America, (2004).
- [9] Firmansyah A.F, P. Ontoseno, Dimas F.U.P, "*Penentuan lokasi dan ukuran optimal distributed generation (DG) menggunakan metode analitis pada jaringan distribusi radial dengan mempertimbangkan rugi-rugi jaringan daya listrik dan profil tegangan berbasis geographical information system (GIS)*". Digilib.ITS, Surabaya (2017)

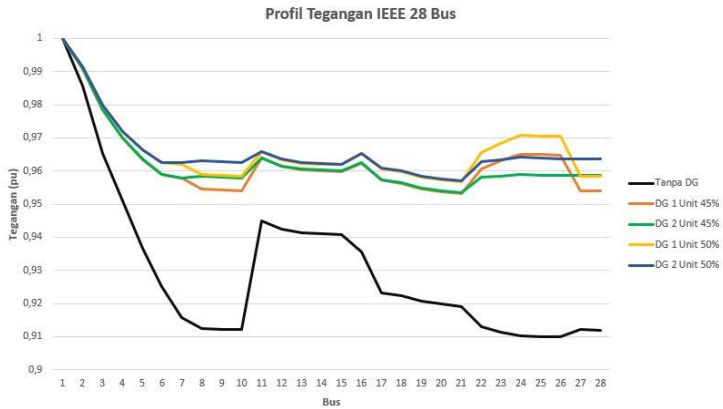
- [10] Wang, Caisheng; Nehrir, M Hashem, "Analytical Approaches for Optimal Placement of Distributed Generation Sources in Power Systems," *IEEE*, vol. 19, no. POWER SYSTEMS, p. 9, 2004.
- [11] W.N. Rizka, "*Alogritma Aliran Daya untuk Sistem Distribusi Radial dengan Beban Sensitif Tegangan*", Digilib.ITS, Surabaya 2014
- [12] Ruzi R.S, P. Ontoseno, Ariyani N.K, "*Analisis dan Evaluasi Kestabilan Tegangan dengan Metode Continuation Power Flow (CPF) pada Sistem Microgrid*", Jurnal Teknik ITS, Surabaya (2016)
- [13] P. Kundur, "*Power System Stability and Control*", EPRI Power System Engineering Series (Mc Graw-Hill, New York, 1994)
- [14] Hadi Saadat, "*Power System Analysis*", McGraw-Hill, Singapore, (2004)
- [15] Abdel-Akher, Mamdouh, "*Voltage Stability Analysis Of Unbalanced Distributiom System Using Backward/Forward Sweep Load-Flow Analysis Method With Secant Predictor*", IET Gener. Transm. Distrib., 2013, Vol.7 Iss. 3, pp. 309-317 309
- [16] Abdel-Akher, Mamdouh, "*A Continuation Power-Flow for Distribution Systems Voltage Stability Analysis*", IEEE PECon, 2012
- [17] Afzalan M, Taghikhani M.A, "*DG Placement and Sizing in Radial Distribution Network Using PSO&HBMO Algorithms*", Energy and Power, 2012
- [18] O.M. Mohammed, R. Harikumar, M.K. Fathima, "*Siting and Sizing of Distributed Generation by Adaptive Particle Swarm Optimization*". Elsiver, 2014

LAMPIRAN

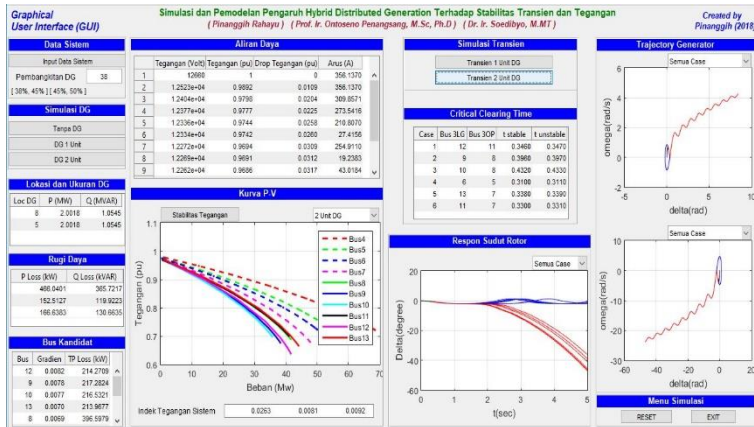
Lampiran 1. Profil Tegangan IEEE 13 Bus



Lampiran 2. Profil Tegangan IEEE 28 Bus



Lampiran 3. Tampilan *Graphical User Interface* (GUI)



BIODATA PENULIS



Penulis bernama **Pinanggih Rahayu**. Lahir di Madiun tanggal 13 Agustus 1995. Sepak terjang pendidikan penulis dimulai dari SD Purworejo 01 lulus tahun 2008, SMPN 1 Mejayan lulus tahun 2011, SMAN 1 Mejayan lulus tahun 2014, dan melanjutkan studi di S1 Teknik Elektro ITS angkatan 2014. Selama menjalani proses studi, penulis aktif di berbagai organisasi seperti di BEM FTI ITS, Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro dan sebagai Electric Engineer di ITS Solar Car Racing Team (Molina). Selain itu penulis juga aktif di dunia karya ilmiah dan sudah dua kali mendapatkan hibah penelitian PKM oleh Kemristekdikti. Penulis dapat dihubungi melalui LinkedIn dengan akun Pinanggih Rahayu.

Halaman ini sengaja dikosongkan